



Diseño y construcción de un equipo para medir la conductividad térmica de un fluido

Bosquez García, Fernando Paúl y Gutiérrez Mena, Isaac Fernando

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Páez Flor, Nicolás Marcelo PhD

02 de junio del 2021



Document Information

Analyzed document	TESIS FINAL V3.docx (D110494853)
Submitted	7/15/2021 8:30:00 PM
Submitted by	Cortez Pazmiño Byron Hernan
Submitter email	bhcortez@espe.edu.ec
Similarity	4%
Analysis address	bhcortez.espe@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS FINAL.pdf Document TESIS FINAL.pdf (D61004031) Submitted by: llgoyos@espe.edu.ec Receiver: llgoyos.espe@analysis.arkund.com	 2
W	URL: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-5000/UCC5007_01.pdf Fetched: 2/24/2021 8:26:47 AM	 1
W	URL: http://cbdprescriptions.co.uk/download/problemas-de-ingenieria-termica-aplicada-1.pdf-a5b39f0a404522 Fetched: 5/29/2021 1:51:37 AM	 1
SA	Transferencia_de_Calor_y_Masa_-_Cengel_4.pdf Document Transferencia_de_Calor_y_Masa_-_Cengel_4.pdf (D49657807)	 5
W	URL: https://dokumen.pub/transferencia-de-calor-y-masa-4ta-edicion.html Fetched: 1/15/2021 2:54:31 AM	 3
SA	Juan Emanuele Valdivieso Ortega.pdf Document Juan Emanuele Valdivieso Ortega.pdf (D102341670)	 1
W	URL: http://www.fisica.uns.edu.ar/albert/archivos/21/254/2438481309_f1.pdf Fetched: 11/17/2020 8:01:09 AM	 2
SA	9384 salas_bf.pdf Document 9384 salas_bf.pdf (D35753904)	 3
W	URL: https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/7730/1/T05778.pdf Fetched: 11/27/2019 5:03:26 PM	 1
W	URL: https://baixardoc.com/documents/transferencia-de-calor-y-masa-4ta-ed-yunus-cengel-5d1527a547115 Fetched: 1/5/2021 7:04:25 PM	 1
W	URL: https://core.ac.uk/download/pdf/76602547.pdf Fetched: 7/15/2021 8:31:00 PM	 2
	URL: https://www.u-cursos.cl/usuario/cfd91cfd8924f74aa09d82a334726d1/mi_blon/r/Transferencia_de_Calor_y_Masa	



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**Diseño y construcción de un equipo para medir la conductividad térmica de un fluido**" fue realizado por los señores **Bosquez García Fernando Paul y Gutierrez Mena Isaac Fernando** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de julio de 2021

Firma:

Ing. Páez Flor, Nicolás Marcelo PhD.

CI: 1714097985.



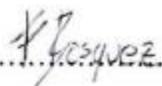
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Bosquez García, Fernando Paúl y Gutiérrez Mena, Isaac Fernando**, con cédulas de ciudadanía n° 1720891059 y n° 1722306394, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño y construcción de un equipo para medir la conductividad térmica de un fluido** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolqui, 15 de julio de 2021

Firma

.....


Bosquez García Fernando Paul

CI: 1720891058

Firma

.....


Gutiérrez Mena Isaac Fernando

CI: 1722306394



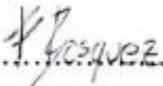
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros **Bosquez García, Fernando Paúl y Gutiérrez Mena Isaac Fernando**, con cédulas de ciudadanía n°1720891058 y n°1722306394, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño y construcción de un equipo para medir la conductividad térmica de un fluido** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 15 de julio de 2021

Firma

.....


Bosquez García Fernando Paul

CI: 1720891058

Firma

.....


Gutiérrez Mena Isaac Fernando

CI: 1722306394

Agradecimiento

A Dios y la virgen por guiarme durante todo este arduo camino. A toda mi familia; mi hermana, cuñado, tío, abuelitos, cada uno de ellos que aportaron con su granito de arena, pero principalmente a mis padres que siempre estuvieron a mi lado apoyándome y dándome fuerzas para que pueda cumplir con este objetivo. Por último, pero no por eso menos importante al ingeniero Nicolás Páez y al ingeniero Edgardo Fernández por todo su tiempo, paciencia y asesoramiento que nos brindaron.

Fernando Paúl Bosquez García

En primer lugar, mi agradecimiento es a Dios, quien con sus bendiciones guía mi camino y me da fortaleza aún en los momentos difíciles para avanzar y culminar con éxito mi carrera universitaria. De igual manera agradezco a mis padres que son el pilar fundamental para mis logros puesto que con su cariño y apoyo incondicional constituyen un motor para cumplir mis metas personales y profesionales. A mis hermanos les agradezco por su apoyo y motivación que me brindaron a lo largo de mi vida estudiantil. Y por último agradezco al Ing. Nicolás Páez y al Ing. Edgardo Fernández por su ayuda brindada en el desarrollo de este trabajo.

Isaac F. Gutiérrez M.

Dedicatoria

A mis padres, este logró es para ustedes.

Fernando Paúl Bosquez García

El presente trabajo lo dedico de manera especial a mi familia, quienes han sido una parte esencial para el cumplimiento de mi objetivo y terminar con éxito una etapa importante de mi vida.

Isaac F. Gutiérrez M.

Índice de contenidos

Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Agradecimiento	6
Dedicatoria.....	7
Índice de contenidos	8
Índice de tablas.....	11
Índice de figuras.....	12
Resumen	13
Abstract.....	14
Generalidades.....	15
Antecedentes	15
Objetivos	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos.....	17
Alcance	17
Justificación e Importancia	18
Justificación Técnica.....	18
Justificación Académica	18
Marco teórico	19
Transferencia de Calor	19
Mecanismos de transferencia de calor	20
Conducción	21
Conductividad térmica	22
Métodos para medir la conductividad térmica.....	26
Convección.....	27
Convección forzada.....	28
Convección natural	28
Conducción unidimensional de calor en estado estacionario	29
Pared plana	30
Cilindros	31
Método de resistencias térmicas.....	32

Análisis y diseño	34
Análisis de alternativas de diseño.....	34
Cilindros concéntricos.....	34
The hot wire (Hilo caliente).....	35
Método Flash	36
Matriz de decisión.....	37
Consideraciones de diseño del método de cilindros concéntricos.....	39
Diseño de los cilindros	41
Análisis de materiales	41
Análisis de diseño.....	43
Diseño de las tapas	46
Análisis de materiales	46
Análisis de diseño.....	47
Diseño de soporte de ensamble	47
Análisis de materiales	47
Análisis de diseño.....	48
Diseño del tanque	49
Análisis de materiales	49
Análisis de diseño.....	49
Elementos complementarios	55
Termocuplas.....	55
Resistencia del tanque	58
Bomba para el tanque.....	58
Panel de control.....	59
Especificaciones del equipo	60
Desarrollo del modelo matemático	62
Experimentación y análisis de resultados.....	66
Mediciones realizadas en el equipo.....	66
Configuración y preparación del equipo.....	66
Ejemplo de cálculos.....	67
Resultados obtenidos de los procesos experimentación	70
Análisis de los resultados del agua destilada.....	77
Análisis de resultados de la glicerina	78

Propagación de errores.....	78
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro.....	82
Conclusiones.....	82
Recomendaciones.....	83
Trabajos futuros.....	84
Bibliografía.....	85
Anexos.....	87

Índice de tablas

Tabla 1 Mecanismos de transferencia de calor.....	20
Tabla 2 Conductividad térmica de materiales a temperatura ambiente.....	25
Tabla 3 Valores del coeficiente de transferencia de calor por convección	29
Tabla 4 Características de los diferentes métodos	38
Tabla 5 Características de los materiales	42
Tabla 6 Detalle de los elementos del equipo	60
Tabla 7 Datos geométricos de los cilindros concéntricos.....	67
Tabla 8 Datos experimentales de la conductividad del agua.....	67
Tabla 9 Datos geométricos y constantes utilizadas para el cálculo de la conductividad térmica de un fluido	69
Tabla 10 Parte de los datos generados en el equipo para la glicerina	69
Tabla 11 Cálculo de la conductividad térmica del agua destilada. Utilizando el primer método	70
Tabla 12 Cálculo de la conductividad térmica del agua destilada. Utilizando el segundo método	72
Tabla 13 Cálculo de la conductividad térmica de la glicerina. Utilizando el primer método K_{exp}	74
Tabla 14 Cálculo de la conductividad térmica de la glicerina. Utilizando el segundo método K_{exp}	75
Tabla 15 Datos para encontrar la propagación de errores	81
Tabla 16 Tabla de resultados de los errores.....	81

Índice de figuras

Figura 1 <i>Ejemplo de transferencia de calor</i>	19
Figura 2 <i>Representación de estados de la materia</i>	23
Figura 3 <i>Conductividad térmica de sólidos, líquidos y gases en función de la temperatura</i>	24
Figura 4 <i>Esquema de pared plana para conducción unidimensional</i>	30
Figura 5 <i>Esquema de cilindro hueco para conducción unidimensional</i>	31
Figura 6 <i>Analogía entre resistencia eléctrica y resistencia térmica</i>	33
Figura 7 <i>Dimensiones de los cilindros concéntricos</i>	46
Figura 8 <i>Dimensiones de las tapas</i>	47
Figura 9 <i>Disposición de los agujeros de la estructura de centrado</i>	48
Figura 10 <i>Ensamble estructura de centrado y conjunto tapas-cilindros</i>	49
Figura 11 <i>Dimensiones tanque interno</i>	50
Figura 12 <i>Esquema de transferencia de calor de la chapa metálica</i>	50
Figura 13 <i>Dimensiones tanque externo</i>	52
Figura 14 <i>Esquema de transferencia de calor multicapas (chapas metálicas y fibra de vidrio)</i>	53
Figura 15 <i>Ensamble del tanque interno y externo</i>	55
Figura 16 <i>Disposición de las termocuplas</i>	56
Figura 17 <i>Distribución del panel de control</i>	59
Figura 18 <i>Esquema del equipo para medir la conductividad térmica de un fluido</i>	60
Figura 19 <i>Conducción en estado estable del sistema (cilindros concéntricos)</i>	62
Figura 20 <i>Gráfico resumen utilizando el primer método de cálculo</i>	72
Figura 21 <i>Gráfico resumen utilizando el segundo método de cálculo</i>	73
Figura 22 <i>Gráfico resumen utilizando el primer método de cálculo</i>	75
Figura 23 <i>Gráfico resumen utilizando el segundo método de cálculo</i>	77

Resumen

En este proyecto de grado se realiza un estudio sobre las propiedades termofísicas de los fluidos siendo más específico de la conductividad térmica, para alcanzar este propósito se realiza el diseño y construcción de un equipo con el modelo de cilindros concéntricos para determinar la conductividad térmica de dos fluidos: el agua destilada y la glicerina. Además, se utiliza analogías de transferencia de calor con la electricidad lo que permite elaborar una ecuación que describe la transferencia de calor producida en el experimento. Para evaluar los resultados obtenidos se comparó los valores experimentales con los valores teóricos de los dos fluidos testeados. El resultado obtenido es un comportamiento caótico del agua donde el rango de temperatura donde se logró los mejores resultados fue 32°C a 40°C en este intervalo existe un error del 18.90% y el valor promedio de la conductividad térmica es de $0.523 \frac{W}{m}$, mientras que la glicerina, su comportamiento fue estable donde el rango de temperatura testada es de 20°C a 48°C donde existe un error máximo de 21.78% y el valor promedio de la conductividad térmica fue de $0.304 \frac{W}{m}$. La variable de diseño que sobresale en esta investigación es el espacio anular de 2.5 mm que existe entre los cilindros concéntricos esto permite minimizar la convección natural de un fluido.

Palabras Claves

- **CONDUCTIVIDAD TÉRMICA**
- **TRANSFERENCIA DE CALOR**
- **PROPIEDADES TERMOFÍSICAS**
- **DISEÑO TÉRMICO**
- **CILINDROS CONCÉNTRICOS**

Abstract

In this degree project a study is carried out about thermophysical properties of fluids, being more specific of thermal conductivity, to achieve this purpose the design and construction of an equipment with the model of concentric cylinders to determine the thermal conductivity of two fluids: distilled water and glycerin. In addition, analogies of heat transfer with electricity are used, in order to create an equation that describes the heat transfer produced in the experiment. To evaluate the results obtained, the experimental values were compared with the theoretical values of the two fluids tested. The result obtained is a chaotic behavior of the water where the temperature range where the best results were achieved from 32 ° C to 40 ° C in this interval there is an error of 18.90% and the average value of the thermal conductivity is $0.523 \frac{W}{m}$, while glycerin, its behavior was stable where the temperature range tested is from 20 ° C to 48 ° C, there is a maximum error of 21.78% and the average value of thermal conductivity was $0.304 \frac{W}{m}$. The design variable that stands out in this research is the annular space of 2.5 mm, it exists between the concentric cylinders, that allow to minimize the natural convection of a fluid.

Palabras Claves

- **THERMAL CONDUCTIVITY**
- **HEAT TRANSFER**
- **THERMOPHYSICAL PROPERTIES**
- **THERMAL DESIGN**
- **CONCENTRIC CYLINDERS**

Capítulo I

Generalidades

Antecedentes

El sector industrial se encuentra lleno de procesos en los cuales existen transferencias o intercambios de energía por lo que es de suma importancia el poder determinar las propiedades termofísicas de los materiales, que son parte de este proceso, sin importar que estos sean sólidos como por ejemplo metales, plásticos; o fluidos como puede ser gas licuado de petróleo, combustibles, pulpas de frutas, entre otros.

Una de estas propiedades termofísicas que es relevante su determinación es la conductividad térmica. Existen varios métodos para determinar dicha propiedad termofísica de los materiales.

Sin embargo, en cuanto se refiere a medir la conductividad térmica de fluidos no existe un método de medición directa, por lo que se debe obtener varios datos de forma experimental y mediante un análisis matemático de la mecánica de fluidos y transferencia de calor, se puede obtener de forma indirecta la conductividad térmica de un fluido.

Para realizar este análisis se debe tomar en cuenta las condiciones de contorno específicas para el problema y partir desde las ecuaciones diferenciales bases para cada área (mecánica de fluidos y transferencia de calor).

Van Der Held & Van Drunen (1949) propusieron un método de medición de la conductividad térmica de líquidos, en el cual, para evitar problemas con la transferencia de calor y la convección, utilizan un método no estacionario que tiene un principio similar al “hot wire” o hilo caliente utilizado como anemómetro para medir el flujo de aire a diferentes velocidades.

Bellet, Sengelin, & Thirriot (1975) utilizan una célula de cilindros concéntricos para determinar las propiedades termofísicas de líquidos no newtonianos, tales como la conductividad térmica y calor específico.

A partir de este estudio presentado por Bellet, Sengelin, & Thirriot (1975) surgieron varios más que utilizaron esta misma célula de cilindros concéntricos para determinar la conductividad térmica de fluidos, debido a la simplicidad en cuanto a la elaboración de este equipo y en cuanto al análisis numérico necesario para determinar dicha propiedad.

(Telis-Romero, Telis, Gabas, & Yamashita, 1998) con un estudio de las propiedades termofísicas del jugo de naranja brasileño y (Giraldo-Gómez, Gabas, Telis Nicoletti, & Telis-Romero, 2010) con un estudio de las propiedades termofísicas del jugo concentrado de lulo demuestran la gran aplicación que puede tener esta célula de cilindros concéntricos para determinar las propiedades termofísicas de fluidos en diferentes ramas y sectores de la ingeniería como en este caso el de los alimentos.

Costa B., Silva, & Vieira M (2019) realizan un análisis numérico y experimental de la metodología de cilindros concéntricos para medir la conductividad térmica en fluidos, en el que utilizan herramientas actuales como por el ejemplo la dinámica computacional de fluidos, para analizar esta metodología.

En nuestro país no existe ninguna empresa o laboratorio que construya o tenga a su disposición estos equipos para medir la conductividad térmica de líquidos, por lo que es necesario importar dichos equipos, lo que conlleva un gran costo o inclusive se deben enviar muestras del fluido a analizar a otros países para obtener la conductividad térmica y esto conlleva mucho de tiempo de espera y tiempo perdido.

En cuanto a términos de investigación realizada en nuestro país relacionada al tema, la Universidad Técnica de Ambato junto a la Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, México presentaron un artículo sobre un Estudio de un nuevo procedimiento para medir la conductividad y difusividad térmicas de materiales (Hechavarría, Delgado, & Pazmiño, 2017).

Finalmente, Vera Alvarado & Rueda Palacios (2018) en la Universidad Politécnica del Litoral realizaron una tesis con el tema de Diseño y construcción de un equipo medidor de conductividad térmica. En este estudio se realiza la construcción de un equipo de placa plana para medir la conductividad térmica de sólidos en estado estable.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar y construir un equipo para medir la conductividad térmica de un fluido.

Objetivos Específicos

- Determinar el modelo adecuado para el diseño del equipo.
- Implementar un análisis de selección de materiales para la construcción del equipo.
- Implementar un panel de control para visualizar los datos
- Desarrollar un modelo matemático que permita determinar la conductividad térmica de un fluido
- Calibrar y determinar el error de medición del equipo

Alcance

El proyecto tiene la finalidad de diseñar y construir un equipo que pueda medir la conductividad térmica de un fluido.

La medición del coeficiente de conductividad térmica de un fluido se determina de una forma indirecta, esto quiere decir que el equipo no va a entregar directamente el valor de la conductividad térmica del fluido a testear, lo que el equipo va a entregar son datos que posteriormente mediante un modelo matemático se puedan utilizar para la determinación de la conductividad térmica.

El equipo debe estar calibrado mediante la medición de un fluido cuya conductividad térmica sea conocida y mediante el cual se pueda determinar el error de medición.

Justificación e Importancia

Justificación Técnica

El diseño y construcción de un equipo para medir la conductividad térmica de un fluido es muy importante ya que con este equipo se podría ayudar a varios sectores industriales del país como son el sector alimenticio, petrolero y de la construcción.

Justificación Académica

La Mecánica de Fluidos y la Transferencia de Calor son dos ramas que tiene mucha relación y que son muy importantes dentro de los conocimientos fundamentales que debe tener un ingeniero mecánico.

Es fundamental el poder entender y el poder realizar un análisis tanto técnico como matemático de las propiedades termofísicas de los materiales y sus cambios o transformaciones que se generan dentro de los diversos procesos industriales.

Capítulo II

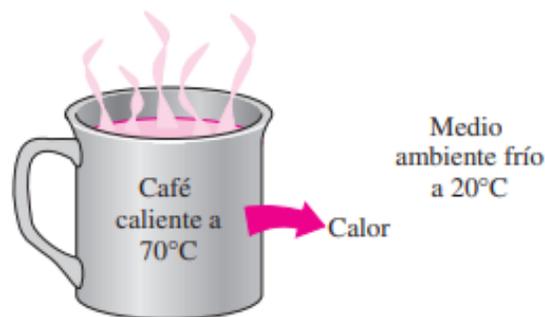
Marco teórico

Transferencia de Calor

Partamos de un simple ejemplo para poder entender que es la transferencia de calor, tenemos una taza de café caliente que la dejamos en una habitación (ver Figura 1), al pasar el tiempo esta taza de café se pone tibia y después de lapso de tiempo más largo esta taza de café simplemente está a temperatura ambiente. El fenómeno por el cual la taza de café pasó de estar caliente a temperatura ambiente, es la transferencia de calor; es decir, se produjo una transferencia de energía del medio caliente (taza de café) hacia el medio frío (habitación).

Figura 1

Ejemplo de transferencia de calor



Nota: Tomado de *Transferencia de calor y masa* (p. 2), por Cengel & Ghanjar, 2011, McGraw-Hill

Es muy importante tener este concepto bien claro de que la transferencia de calor o energía se produce desde el medio más caliente o que se encuentra a una mayor temperatura hacia el medio con menor temperatura, hasta que ambos llegan a tener la misma temperatura.

Para terminar con la explicación de este fenómeno presentamos otro ejemplo, tenemos una bebida bien fría, recién sacada del refrigerador que la dejamos en una habitación, recordando el concepto planteado anteriormente, la transferencia de energía para este caso va a ser distinta al primer ejemplo planteado; es decir, se va a realizar desde la habitación (medio

a mayor temperatura) hacia la bebida fría (medio a menor temperatura) hasta que ambos alcancen la misma temperatura.

Resumiendo, estos dos ejemplos en una definición más corta y técnica, tenemos que “La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas” (Incropera & De Witt, 1999).

Otra definición planteada por Cengel & Ghajar (2011) para la transferencia de calor es: “La forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de una diferencia en la temperatura”.

Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor siempre va a existir cuando tengamos un medio o entre diferentes medios que se encuentren a diferentes temperaturas, sin embargo, no siempre este intercambio de calor se va a realizar de la misma forma o del mismo modo.

Principalmente existen tres mecanismos o modos de transferencia de calor que son: conducción, convección y radiación.

Tabla 1

Mecanismos de transferencia de calor

Conducción	Convección	Radiación
Transferencia de energía en un sólido, líquido o gas	Transferencia de energía de un sólido a un líquido o gas en movimiento	Energía emitida en forma de ondas por un cuerpo

Conducción

“La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas” (Incropera & De Witt, 1999).

“La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas” (Cengel & Ghajar, 2011).

Como se detalla en la Tabla 1, la transferencia de calor por conducción se puede dar en sólidos, líquidos o gases, no obstante, el fenómeno en cada uno de estos medios es diferente. En el caso de los sólidos la conducción se debe a vibraciones reticulares de las moléculas y al transporte de la energía por parte de los electrones libres (Cengel & Ghajar, 2011).

Por otra parte, para los gases y líquidos podemos analizarlo como un solo caso ya que las moléculas se encuentran distribuidas de forma similar, por lo que la conducción corresponde a la difusión y colisión de estas debido a su movimiento aleatorio (Cengel & Ghajar, 2011).

Adicionalmente existen otros parámetros como las características geométricas y las propiedades del material que son muy importantes dentro del análisis de la conducción de calor.

Esto se encuentra evidenciado de mejor manera en la formulación y ecuaciones que rigen para la conducción de calor, específicamente existe un modelo o ecuación principal y de la cual se parte para cualquier tipo de análisis, que es la Ley de Fourier.

$$\dot{q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad [1]$$

Donde,

K	Conductividad térmica
A	Área de transferencia de calor

dT/dx Gradiente de temperatura

\dot{q}_{cond} Razón de la conducción de calor

Esta ecuación representa la razón de la conducción de calor a través de una pared plana y existen varios términos que cabe detallar su significado.

El gradiente de temperatura (dT/dx) es la tasa de cambio de la temperatura con respecto a x , en otras palabras, es la pendiente de la curva de temperatura en un diagrama T vs x (Cengel & Ghajar, 2011).

El área de transferencia de calor es el área que se encuentra perpendicular a la dirección de flujo del calor.

La conductividad térmica es una propiedad termofísica distintiva de cada material que mide la capacidad al paso del calor, en otras palabras, que tan fácil conduce un material el calor.

Esta misma ecuación de la Ley de Fourier, se la puede expresar en coordenadas cilíndricas para cuando tenemos un caso de análisis de un cilindro sólido o hueco.

$$\dot{q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dr} \quad [2]$$

Conductividad térmica

La conductividad térmica (k) es una de las propiedades termofísicas primordiales que se encuentra involucrada en procesos industriales de transferencia de calor y es diferente para cada material.

$$k \rightarrow \left[\frac{W}{m^{\circ}C} \right] \quad [3]$$

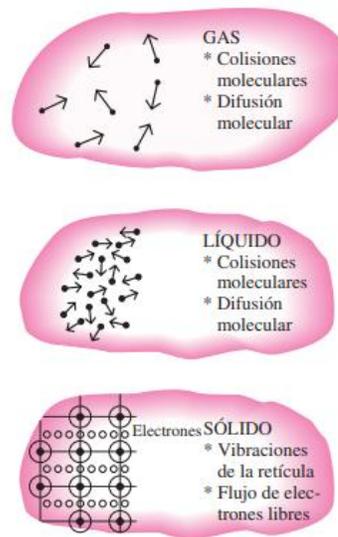
“La conductividad térmica de un material se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura” (Cengel & Ghajar, 2011).

“La conductividad térmica k es una propiedad termodinámica y varía con la temperatura y la presión en forma análoga a la viscosidad” (White, 2004).

La conductividad térmica de los materiales varía dependiendo del estado o forma de agregación en el cual se encuentra. Generalmente, la conductividad térmica de un material tiene su valor máximo cuando se encuentran en la fase sólida y su valor mínimo cuando se encuentran en la fase gaseosa (Cengel & Ghajar, 2011).

Figura 2

Representación de estados de la materia

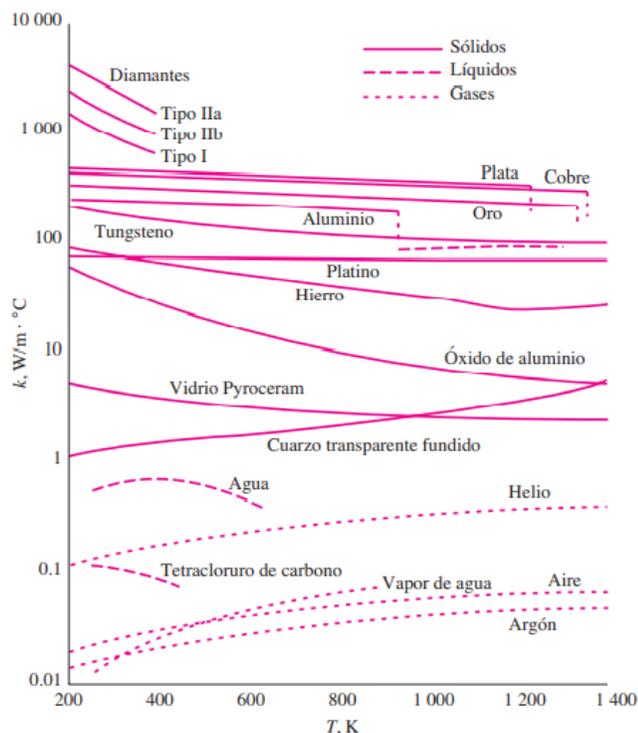


Nota: Tomado de *Transferencia de calor y masa* (p. 22), por Cengel & Ghanjar, 2011, McGraw-Hill

Pero todo tiene una razón, primeramente, tenemos que los materiales sólidos están compuestos por electrones libres y átomos ordenados en una estructura cristalina (ver Figura 2), por lo que la conducción de calor en estos materiales se debe a la migración de electrones libres y a las ondas vibracionales de la estructura cristalina (Incropera & De Witt, 1999). Esto quiere decir que, gracias a esta estructura cristalina bien organizada y ordenada, estos materiales tienen una mejor y mayor conductividad térmica.

Figura 3

Conductividad térmica de sólidos, líquidos y gases en función de la temperatura



Nota Tomado de *Transferencia de calor y masa* (p. 23), por Cengel & Ghanjar, 2011, McGraw-Hill

Esto se encuentra evidenciado en la Figura 3, donde tenemos la conductividad térmica de diferentes materiales sólidos y comparándolos unos con otros, tenemos que los diamantes que son materiales bien ordenados en su estructura cristalina, tienen una mayor conductividad térmica.

Por otro lado, tenemos los materiales en estado líquido y gaseoso, estos tienen un espacio intermolecular mucho mayor en comparación a los sólidos lo que significa que existe un mayor movimiento de los átomos y de forma aleatoria (ver Figura 2), lo que finalmente conlleva a una conducción de calor menos efectiva (Incropera & De Witt, 1999).

Otro aspecto fundamental al analizar la conductividad térmica de los materiales es la temperatura, en la Figura 3 podemos apreciar como varía la conductividad térmica de distintos

materiales, sean estos sólidos, líquidos o gases, en función de la temperatura. Para los materiales sólidos podemos decir que generalmente su conductividad térmica se reduce a una mayor temperatura; a diferencia de los gases que a una mayor temperatura tienen una mayor conductividad térmica.

Si analizamos esta misma figura para el caso de los líquidos no resulta fácil predecir un comportamiento en función de la temperatura, debido a que únicamente existen dos fluidos de ejemplo, el rango de temperaturas que se analizan los fluidos es menor a comparación con los sólidos y gases, y el comportamiento que presenta el agua y el tetracloruro de carbono son distintos.

Sin embargo, “las conductividades térmicas de la mayor parte de los líquidos disminuyen con el incremento de temperatura” (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2006).

Tabla 2

Conductividad térmica de materiales a temperatura ambiente

Material	Conductividad térmica k [W/m.°C]
Diamante	2300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (l)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.607
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Caucho suave	0.13

Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

Nota Tomado de Transferencia de calor y masa (p. 20), por Cengel & Ghanjar, 2011, McGraw-Hill

Que la conductividad térmica varíe en función de la temperatura representa un problema cuando se desea analizar un problema de transferencia de calor, por esta razón comúnmente se utiliza un valor constante de la conductividad térmica a una temperatura promedio que por lo general es la temperatura ambiente (ver Tabla 2).

Métodos para medir la conductividad térmica

Existen numerosos métodos para medir la conductividad térmica de un material, sin embargo, por facilidad y para tener una mejor comprensión de los mismos se los define y se los clasifica en dos grupos grandes: estáticos o de estado estable y dinámicos o de estado transitorio. Estos dos grupos grandes abarcan la determinación de la conductividad térmica ya sea de sólidos, líquidos o gases.

Existen algunos equipos comerciales que sirven para determinar la conductividad térmica y que se encuentran basados en métodos estandarizados por normativas como la ISO, DIN, ASTM, a pesar de ello, la mayoría de los casos los equipos se construyen en laboratorios y centros de investigación que responden a necesidades específicas (Llavona, Zapico, Blanco, Verdeja, & Sancho, *Methods for measuring thermal conductivity*, 1991).

Métodos estáticos. “Para métodos estáticos, es necesario determinar el calor de flujo y la temperatura a lo largo de la muestra, medir la temperatura en dos o más lugares diferentes” (Llavona, Zapico, Blanco, Verdeja, & Sancho, *Methods for measuring thermal conductivity*, 1991).

Métodos dinámicos. Este método requiere de instrumentos de mucha precisión que registren rápidamente los cambios de temperaturas y debido al alto nivel dificultad con la formulación requerida para este método, es necesario el uso de computadores para su

resolución (Llavona, Zapico, Blanco, Verdeja, & Sancho, Methods for measuring thermal conductivity, 1991).

Entre los métodos dinámicos desarrollados podemos mencionar el modelo de hilo caliente y el modelo flash (Llavona, Zapico, Blanco, Verdeja, & Sancho, Methods for measuring thermal conductivity, 1991).

Convección

“La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos” (Cengel & Ghajar, 2011).

“La convección térmica es el transporte de energía interna por el movimiento de un fluido” (Rieutord, 2015).

El mecanismo de transferencia de calor por convección, en realidad está compuesto por dos modos o fenómenos internos. Primero tenemos una transferencia entre la superficie del fluido (líquido o gas) y la del sólido, debido al movimiento aleatorio de las moléculas que tienen los fluidos, en otras palabras, existe una transferencia de calor por conducción; y a la vez debido al movimiento global o macroscópico del fluido existe otra transferencia de calor, ya que el fluido que anteriormente tuvo una transferencia de energía por conducción y que varió su temperatura es desplazado y reemplazado por un fluido que aún no tiene este intercambio de energía.

Existe una excepción de transferencia de calor por convección la cual no es entre un fluido en movimiento y un sólido. Cuando a un fluido se le calienta y este empieza a cambiar de fase, se considera este fenómeno como convección debido al movimiento que tiene el fluido durante ese proceso. (Cengel & Ghajar, 2011)

“La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo” (Incropera & De Witt, 1999).

Convección forzada

“La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento” (Incropera & De Witt, 1999).

“Hablamos de convección forzada cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos” (Incropera & De Witt, 1999).

Convección natural

“Se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido” (Cengel & Ghajar, 2011).

“La convección libre (o natural) el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido” (Incropera & De Witt, 1999).

A pesar de que existen dos tipos de convección, existe una sola ecuación o formulación para cuando es necesario analizar este fenómeno.

$$\dot{q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad [4]$$

Donde,

h	coeficiente de transferencia de calor por convección
A	área superficial en la cual se tiene la transferencia de calor
T _s	temperatura de la superficie del sólido
T _∞	temperatura del fluido

Esta expresión es conocida como la Ley de Newton del enfriamiento.

A diferencia de la conductividad térmica, el coeficiente de transferencia de calor por convección no es una propiedad del material, en este caso del fluido. Este es un parámetro que se obtiene de forma experimental y que depende de diferentes variables que están

involucradas en la convección como, por ejemplo: la configuración geométrica del sólido, la naturaleza del flujo como su velocidad o propiedades. (Cengel & Ghajar, 2011)

Tabla 3

Valores del coeficiente de transferencia de calor por convección

Tipo de convección	h [W/m².°C]
Convección libre de gases	2 – 5
Convección libre de líquidos	10 – 1000
Convección forzada de gases	25 – 250
Convección forzada de líquidos	50 – 20000
Ebullición y condensación	2500 – 100000

Nota Tomado de Transferencia de calor y masa (p. 26), por Cengel & Ghanjar, 2011, McGraw-Hill

En la Tabla 3, se puede valor un rango de valores entre los cuáles se encuentra el coeficiente de calor por convección, haciendo distinción si son líquidos o gases, si la naturaleza de convección es libre o forzado e inclusive para el caso de convección por cambio de fase.

Conducción unidimensional de calor en estado estacionario

Antes que todo se deben definir dos conceptos muy importantes, primero el término unidimensional hace referencia a que solamente se necesita una coordenada o dirección para describir la variación de la temperatura y segundo el término estado estacionario significa que el sistema se encuentra estable, es decir la temperatura en cada punto es independiente del tiempo (Incropera & De Witt, 1999).

En base a estas condiciones que definen a la conducción unidimensional de calor en estado estacionario se puede analizar los diferentes casos en base a la geometría del cuerpo donde se genera la transferencia de calor, es decir se lo podría clasificar para una pared plana, un cilindro y una esfera.

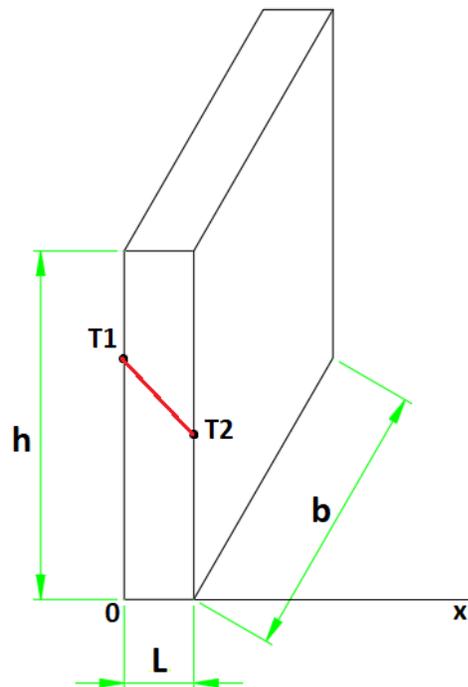
Para el análisis de cualquiera de estos casos de transferencia de calor en función de su geometría se puede partir de la ecuación de la ley de Fourier.

Pared plana

Analizando la Figura 4 tenemos una pared plana de base b , altura h y espesor L , la cual tiene una diferencia de temperatura a través del espesor L , siendo T_1 mayor que T_2 , es decir que la transferencia de calor se da de T_1 a T_2 .

Figura 4

Esquema de pared plana para conducción unidimensional



Partiendo de la ecuación de la ley de Fourier en coordenadas cartesianas tenemos:

$$\dot{q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad [5]$$

Donde \dot{q}_{cond} , k y A son constantes, es decir nuestras variables de integración son T y x , con lo que despejando tenemos:

$$\dot{q}_{cond} * dx = -kA * dT \quad [6]$$

Tomando las coordenadas de la Figura 4 tenemos que se va integrar de $x = 0$ a L y para la temperatura de T_1 a T_2 .

$$\int_0^L \dot{q}_{cond} * dx = \int_{T_1}^{T_2} -kA * dT$$

$$\dot{q}_{cond} * L = -KA * (T_2 - T_1) \quad [7]$$

Despejando \dot{q}_{cond} tenemos la ecuación para determinar la razón de la conducción de calor a través de una pared plana.

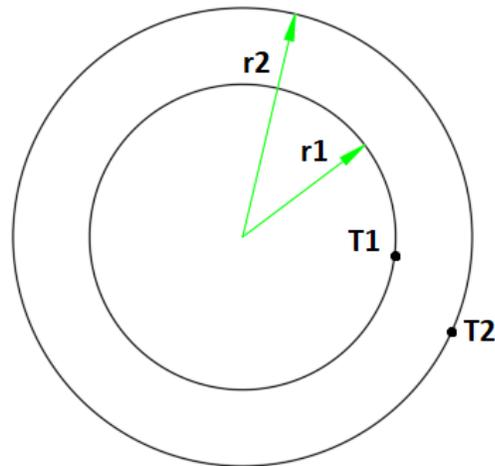
$$\dot{q}_{cond} = KA * \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad [8]$$

Cilindros

En este caso analizamos la Figura 5 se trata de un cilindro hueco, es decir un tubo, que tiene como longitud L, radio interno r1 y radio externo r2. La temperatura interna del tubo T1 es mayor a la temperatura externa T2, es decir se tiene una transferencia de calor desde la parte interna del tubo hacia el exterior.

Figura 5

Esquema de cilindro hueco para conducción unidimensional



Partiendo nuevamente de la ecuación de la ley de Fourier, pero en este caso en coordenadas cilíndricas, tenemos:

$$\dot{q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dr} \quad [9]$$

Donde \dot{q}_{cond} , k , son constantes y el área es $A = 2\pi rL$, reemplazando esto en la ecuación [9] y despejando nuestras variables de integración T y r , tenemos:

$$\frac{\dot{q}_{cond}}{2\pi * r * L} * dr = -k * dT \quad [10]$$

Los puntos a analizar serían r_1 y r_2 , que es donde se encuentran T_1 y T_2 que serían nuestros límites de integración.

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\dot{q}_{cond}}{2\pi * r * L} * dr = \int_{T_1}^{T_2} -k * dT$$

$$\frac{\dot{q}_{cond}}{2\pi * L} * \ln \frac{r_2}{r_1} = -k * (T_2 - T_1)$$

$$\dot{q}_{cond} = 2\pi * L * k * \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [11]$$

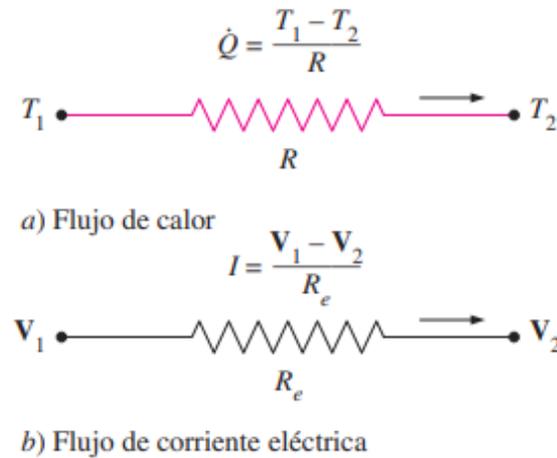
Esta es la ecuación de la razón de la conducción de calor a través de un tubo.

Método de resistencias térmicas

Debemos partir de que existen varias analogías entre la electricidad y el calor, por ejemplo, existe una analogía entre la difusión de calor y la carga eléctrica. De la misma forma existe una analogía entre resistencia eléctrica con la conducción de electricidad y una resistencia térmica con la conducción de calor (Incropera & De Witt, 1999).

Figura 6

Analogía entre resistencia eléctrica y resistencia térmica



Nota Tomado de Transferencia de calor y masa (p. 137), por Cengel & Ghanjar, 2011, McGraw-Hill

Estas analogías se pueden evidenciar de mejor forma en la Figura 6, donde la razón de calor equivale a la corriente eléctrica, la variación de temperatura equivaldría a la variación de voltaje y la resistencia eléctrica equivale a la resistencia térmica que va a ser diferente para cada caso. Si analizamos los casos anteriores de la pared plana y de los cilindros tenemos que las resistencias térmicas para estos casos serían las siguientes:

Pared plana	$R = \frac{L}{kA}$	
Cilindro hueco	$R = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi * L * k}$	[12]

Para un caso de transferencia de calor por convección se puede aplicar el mismo método de resistencias térmicas con lo que quedaría de la siguiente forma:

$$\dot{q}_{conv} = \frac{T_s - T_\infty}{R_{conv}}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_s}$$

[13]

Capítulo III

Análisis y diseño

Análisis de alternativas de diseño

Se puede clasificar en dos grandes grupos los métodos utilizados para determinar la conductividad térmica, el primero es llamado el método de estado estacionario mientras que el segundo es método dinámico o no estacionario.

En el método estacionario la formulación matemática es relativamente simple, este procedimiento requiere un sistema de compensación de pérdida de calor o aislamiento térmico para la determinación precisa de la conductividad térmica. Una ventaja del método es que las muestras pueden ser sólidas como también líquidas con ciertas condiciones de frontera en las cuales la temperatura no cambie radicalmente de la muestra; por lo tanto, este método requiere mucho tiempo. Es importante tener en cuenta que la conductividad térmica no se puede medir a temperatura ambiente. Entre los modelos de estado estacionario destaca el de cilíndricos concéntricos.

En el método dinámico o no estacionario la formulación matemática es compleja se debe utilizar métodos informáticos para la resolución de ecuaciones; incluso los instrumentos de medición deben ser altamente precisos porque se debe registrar el mínimo cambio de temperatura de la muestra. El modelo de hilo caliente es utilizado para este método (Llavona, Zapico, Blanco, Verdeja, & Sancho, Methods for measuring thermal conductivity, 1991).

Cilindros concéntricos

Según Bellet, Sengelin, & Thirriot (1975) el equipo consiste en dos cilindros en posición horizontal y de forma concéntrica, separados por un pequeño espacio anular, el cual lo llenaron con el fluido a ser analizado y mediante una resistencia colocada en el interior del cilindro interno calentaron esta celda para obtener gradientes de temperatura. Según estos autores si

el espacio anular entre los cilindros es suficientemente pequeño y si los gradientes de temperatura no son muy grandes; se puede evitar que se genere la convección.

Según Costa B., Silva, & Vieira M (2018) una condición de diseño es que los cilindros deben ser lo suficientemente largos y una vez que sus extremos están bien aislados, la transferencia de calor es principalmente en la dirección radial y se impide la transferencia de calor axial.

Este modelo nos permite no solo la cuantificación de la conductividad térmica sino también otras propiedades termofísicas de los fluidos, según Sreenivasan & Altman (1969) utilizando este sistema estacionario determinó la difusividad de las sales fusionadas y calores específicos de diferentes fluidos.

Existe ventajas al utilizar este método estacionario y modelo de cilindros concéntricos las cuales son: se puede construir de una forma simple, es económico y no requiere equipos complementarios tan sofisticados y costosos. Otro punto importante es que se puede utilizar para cualquier tipo de fluido lo que resulta útil cuando se utilice en cualquier tipo de industria.

A pesar de esto, este método también cuenta con ciertas restricciones o desventajas como, por ejemplo, si no se controla o se restringe de forma correcta el flujo de calor, se puede generar una transferencia de calor en la dirección axial, lo cual no es deseable. Si los gradientes de temperatura son muy grandes, puede generar que el fluido no se mantenga en reposo y se genera convección.

The hot wire (Hilo caliente)

La tecnología del hilo caliente es parte de un grupo de modelos que utilizan un flujo transitorio de calor para determinar la conductividad térmica. Este flujo de calor transitorio permite que se realice las pruebas muy rápidas, pero como consecuencia de ello, se necesita equipos sofisticados para que la lectura del incremento de temperatura en el sistema sea correcta, además el fundamento matemático es muy exigente, por lo que se necesita la ayuda de las tecnologías computacionales, lo que resulta una gran inversión económica para este

modelo. La técnica del hilo caliente, particularmente, es un buen método para determinar la conductividad térmica de materiales, tales como líquidos, que encajan bien alrededor de un cable delgado que funciona como fuente de calor y sensor de temperatura (Alvarado, Marín, Juárez, & Calderón, 2012).

El modelo matemático desarrollado para el método hot-wire considera una fuente de calor lineal larga (un cable) con una distribución uniforme de la temperatura, a lo largo de inmerso en una muestra de prueba homogénea e infinita.

Según Alvarado, Marín, Juárez, & Calderón (2012) la suposición general es que, como resultado de la transferencia de calor conductiva a la muestra, la temperatura de la fuente varía con el tiempo. La ecuación que rige este fenómeno se deriva de la difusión de calor no estacionaria Ecuación de Fourier con condiciones de límite adecuadas.

El funcionamiento consiste en pasar una corriente eléctrica en un intervalo de tiempo a través de un alambre que fue colocado en el fluido. La producción de calor constante en el cable provoca una temperatura constante en el material. La medición de la temperatura se puede hacer en dos formas: con un termopar o con la variación de la resistencia eléctrica del cable. Esta última vía fue rechazada debido a la dificultad de la medida (Llavona, Zapico, Blanco, Verdeja, & Sancho, Methods for measuring thermal conductivity, 1991).

Método Flash

A lo largo de la última década se utiliza cada vez más este método, para la determinación de la difusividad térmica y conductividad térmica de distintos sólidos, líquidos y polvos. El problema es que se requiere equipos sofisticados y sobre todo muy escasos, por lo tanto, la limitación de este equipo es la parte económica y la dificultad de los modelos matemáticos que rige este método. (LINSEIS, 2021)

En este método, un destello de energía radiante, intenso y corto, es aplicado uniformemente sobre la cara de una pequeña muestra. El pulso de energía se difunde unidireccionalmente hacia el lado opuesto, obteniendo un registro del aumento transitorio de

temperatura en esta cara. La difusividad se calcula a partir del espesor de la muestra y el tiempo necesario para que la temperatura de la cara opuesta alcance la mitad de la variación de temperatura total. El calor específico se calcula a partir de la temperatura máxima alcanzada en la cara opuesta, el espesor y la densidad del material. La conductividad térmica se calcula con el producto de la difusividad por el calor específico y la densidad del material. (Faêda, Lameiras, Carneiro, & Camarano, 2010)

Matriz de decisión

Para este trabajo de titulación, se realiza una comparación entre tres métodos para medir la conductividad térmica de fluidos, para tomar la decisión del mejor método para desarrollar el proyecto.

Los métodos seleccionados son: el método de cilindros concéntricos, el método alambre caliente (hot wire), y el método flash

Las características a analizar son: tipo de método, factor económico, formulación matemática, disponibilidad de componentes y facilidad de uso.

Para poder escoger el mejor método, se utilizó una matriz de decisión con ponderación. Se utilizó un puntaje en una escala del 1 al 10, siendo 1 el peor puntaje o peor opción y 10 el mejor puntaje o mejor opción.

Adicionalmente de las 5 características planteadas, en base a nuestro criterio se decidió establecer un porcentaje de ponderación de importancia, quedando de la siguiente manera:

- Factor económico – 30%
- Disponibilidad de componentes – 30%
- Modelo matemático – 20%
- Tipo de método – 15%
- Facilidad de uso – 5%

Es decir que, para nuestro criterio el factor económico y disponibilidad de componentes tienen una gran importancia ya que son dos características que están relacionadas y que en todo proyecto juegan un rol fundamental para poder determinar la inversión necesaria y el tiempo que va a tomar el proyecto.

Las características de modelo matemático y tipo de método de igual forma están relacionadas entre sí ya que depende del tipo de método, los modelos matemáticos que se van a utilizar. En este caso tienen una importancia media ya que esto más que nada va a determinar la dificultad de cálculos y la necesidad de utilizar otros equipos para resolver estas formulaciones.

Finalmente, la facilidad de uso se considera con una menor importancia ya que, con la práctica, se puede tener un mejor control del equipo y de la experimentación.

En base a todas estas consideraciones de puntaje y porcentaje de importancia, obtuvimos el siguiente cuadro de valoración de los tres métodos planteados (ver tabla 4).

Tabla 4

Características de los diferentes métodos

Características	Cilindros concéntricos	The hot wire (Hilo caliente)	Método Flash
Tipo de método (15%)	8	4	4
Económicas (30%)	8	6	2
Modelos matemáticos (15%)	8	6	4
Disponibilidad de componentes (30%)	8	6	2
Facilidad de uso (5%)	6	8	4

Total	7.5	5.5	2.6
--------------	------------	-----	-----

En base a estos resultados, tenemos que el mejor método es el método de cilindros concéntricos, por lo que se va a utilizar este como método de diseño.

Consideraciones de diseño del método de cilindros concéntricos

El utilizar dos cilindros concéntricos para medir la conductividad térmica de un fluido es un método que se lo utilizó por primera vez en 1975 por un grupo de investigadores en Francia y en base a esta investigación, han surgido varios proyectos más en el que se utiliza este mismo método para medir la conductividad térmica de distintos fluidos.

Sin embargo, a pesar de que ya han pasado más de 45 años desde que se desarrolló el primer equipo, no existe ninguna normativa o manual de cómo se debe construir este equipo. Por esta razón, las consideraciones de diseño serán únicamente las consideraciones planteadas en cada una de las investigaciones encontradas en las que utilizan este método para medir la conductividad térmica de un fluido.

Las consideraciones de diseño que se encontraron son las siguientes:

- El material de los cilindros debe tener una conductividad térmica mucho mayor que el material a ser testado. En (Costa B., Silva, & Vieira M., 2018) utilizan aluminio que tiene una conductividad térmica de 204 W/m*K para construir los cilindros, mientras que en (Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975) utiliza cobre con una conductividad térmica de 400 W/m*K.
- La longitud de los cilindros debe ser lo suficientemente largos para que se caliente todo el cilindro de forma uniforme, es decir esta longitud va a depender del elemento calefactor a utilizar. En (Costa B., Silva, & Vieira M., 2018) y (Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975) utilizan una longitud de 180mm, por su parte (Giraldo-Gómez, Gabas, Telis Nicoletti, & Telis-Romero, 2010) utilizan 220mm.

- Los diámetros de los cilindros de igual forma van a depender del ancho o diámetro del elemento calefactor, más que nada para el diámetro interno del cilindro más pequeño. (Telis-Romero, Telis, Gabas, & Yamashita, 1998) y (Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975) utilizan un diámetro interno del cilindro más pequeño de 10mm, por otra parte, (Costa B., Silva, & Vieira M., 2018) utilizan 9.05mm. Sin embargo, en todas estas investigaciones utilizan un mismo espesor de pared de los dos cilindros que es de 5mm.
- El espacio anular entre los cilindros, como se lo mencionó anteriormente debe ser suficientemente pequeño. (Telis-Romero, Telis, Gabas, & Yamashita, 1998), (Giraldo-Gómez, Gabas, Telis Nicoletti, & Telis-Romero, 2010) y (Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975) utilizan un espacio anular de 2mm, mientras que (Costa B., Silva, & Vieira M., 2018) utilizan un espacio anular de 4.53mm.
- Para evitar la transferencia de calor de forma axial, (Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975) plantean una propuesta que consiste en colocar dos tapas de 50mm de ancho que estén hechas de algún material que tenga baja conductividad térmica, ellos utilizan makrolon que tiene una conductividad térmica de $0.275 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$, mientras que en (Costa B., Silva, & Vieira M., 2018) bajo esta misma consideración utilizan nylon que tiene una conductividad térmica de $0.230 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$.
- Como elemento calefactor, (Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975) y (Giraldo-Gómez, Gabas, Telis Nicoletti, & Telis-Romero, 2010) utilizan una resistencia de 15Ω , por su parte (Costa B., Silva, & Vieira M., 2018) utilizan una resistencia de níquel-cromo de 69.6Ω . Con estos elementos calefactores logran que no exista una variación de temperatura muy grande entre el cilindro interno y externo, la variación que se obtiene en estas investigaciones es de hasta 3°C .

- Para medir la temperatura en cada uno de los cilindros (Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975) utilizan termocuplas diferenciales de cobre-constantán tipo T que están colocadas de forma paralela y opuesta en cada uno de los cilindros y a la mitad de su espesor.
- Para que la temperatura del cilindro externo se mantenga constante, es decir que no exista una transferencia de calor con el ambiente, (Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975) sumergen la celda de cilindros concéntricos en un recipiente adiabático que está lleno de agua o aceite que mantiene la temperatura constante con la temperatura del cilindro externo, de forma muy similar en (Giraldo-Gómez, Gabas, Telis Nicoletti, & Telis-Romero, 2010) sumergen la celda en un baño maría con termostato. Mientras que en (Costa B., Silva, & Vieira M., 2018) utilizan un método diferente, colocan la celda en un flujo de aire que tiene una velocidad de 15 m/s y una temperatura de 30 °C y bajo estas condiciones obtienen el coeficiente de convección para posteriormente calcular la transferencia de calor del cilindro externo.

Diseño de los cilindros

Análisis de materiales

Bajo el criterio de las consideraciones de diseño, el material a ser escogido tiene que ser de mayor conductividad térmica que el del fluido que se va a testear, en base a esta premisa decidimos comparar y escoger entre 5 materiales, que son: cobre, plata, aluminio y oro. Escogimos estos 5 materiales ya que son metales y los metales tienen una conductividad térmica alta.

Nuevamente se va a utilizar una matriz de decisión con ponderación (ver Tabla 5), con puntajes de 1 al 10, para escoger entre los 5 materiales seleccionados la mejor opción.

Las características a analizar son: mecanizado, factor económico, disponibilidad en el mercado y conductividad térmica

De igual forma se establece un porcentaje de ponderación en base a la importancia de cada una de las características:

- Conductividad térmica – 40%
- Factor económico – 25%
- Disponibilidad en el mercado – 25%
- Mecanizado – 10%

Se decidió establecer una importancia alta a la conductividad térmica, ya que es el factor principal que se menciona dentro de las consideraciones de diseño

El factor económico y disponibilidad en el mercado tiene una importancia similar ya que son características que están relacionadas y tienen una importancia media para poder adquirir los materiales.

Por último, el mecanizado tiene una importancia baja, ya que dependiendo del material únicamente va a variar el tipo de equipo y herramienta necesaria para el mecanizado.

Tabla 5

Características de los materiales

Características	Cobre	Plata	Aluminio	Oro
Mecanizado (10%)	8	5	8	2
Económicas (25%)	7	4	8	2
Disponibilidad en el mercado (25%)	8	4	8	2
Conductividad térmica (40%)	7	8	4	6
Total	7.35	5.7	6.4	3.6

En base a estos resultados se ha tomado la decisión de utilizar el cobre para la construcción de los cilindros concéntricos.

Análisis de diseño

El diseño de los cilindros está muy ligado a las características geométricas del elemento calefactor y como se puede apreciar en las consideraciones de diseño no existen unas dimensiones estándar para el diseño de los cilindros, ni tampoco pautas de una normativa en la cual regirse, por lo que se decidió dimensionar en base a los resultados obtenidos en las investigaciones previas que utilizan este método.

La primera consideración que se hizo fue la del elemento calefactor, ya que en base a este se debía dimensionar la longitud y diámetro de los cilindros. El diámetro del elemento calefactor, debía estar entre 9 y 10 mm que es lo propuesto en las investigaciones previas. El diámetro mínimo en el que se podía construir el elemento calefactor, en el proveedor que decidimos utilizar, era de 9.70mm y la longitud en base a ese diámetro podía ser entre 180 a 250mm.

Con esto se decidió construir una resistencia de 9.70mm de diámetro y 200mm de largo. El dato del fabricante es la generación de calor por unidad de área y es de $60W/m^2$ para nuestro elemento calefactor.

Con estas dimensiones, diseñamos los cilindros de 230mm de largo, se decidió hacer los cilindros más largos que la resistencia ya que en la parte terminal donde salen los cables había un fragmento de 35mm aproximadamente que debía estar aislado contra la humedad por lo que se optó que esto esté dentro del cilindro interno ya que en este espacio no iba a ingresar ningún fluido.

Para los diámetros de los cilindros se tenía como primera dimensión el diámetro de la resistencia que vendría a ser el diámetro interior del cilindro interno. Para los demás diámetros y espacio anular se tenía como punto de partida las consideraciones de las demás investigaciones, sin embargo, se decidió no tomar estos valores exactos, sino que utilizar

valores aproximados, para de esta manera tener un estudio autónomo y que pueda servir de comparación con las demás investigaciones.

En base a esto se utilizó un espesor de 7.5mm para cada cilindro y un espacio anular de 2.5mm.

Decidimos aumentar 2.5mm en el espesor de los cilindros en comparación con las investigaciones previas ya que al tener un mayor espacio para que se transfiera el calor, el flujo de calor no iba a ser tan directo con el fluido a ser testeado y de esta forma se favorecía a que no existan problemas de que se genere un flujo bifásico. A pesar de que para que se genere un flujo bifásico debíamos llegar a la temperatura de ebullición de los fluidos a ser testados, lo cual no se iba a hacer durante la experimentación y además de que el flujo de calor del elemento calefactor seleccionado era muy bajo como para que se genere este fenómeno, para que exista un flujo bifásico en el espacio a analizar se necesitaba una resistencia con flujo de calor 10 veces más grande.

Decidimos utilizar un espacio anular de 2.5mm, ya que primero nos basamos en los resultados de las investigaciones que utilizan un espacio anular de 2mm y en la que utilizan un espacio anular de 4.53mm. En la que utilizan un espacio anular de 2mm obtienen buenos resultados con errores menores al 20%, mientras que en la investigación que utilizaron un espacio anular de 4.53mm tienen errores entre el 30 y 40%.

Además, hicimos un análisis matemático en base al número de Rayleigh para determinar si en ese espacio predominaba la conducción o la convección natural. El número de Rayleigh está determinado por la siguiente ecuación:

$$Ra = \frac{g * \beta * \Delta T * Lc^3}{\alpha * \gamma} \quad [14]$$

Donde,

g Gravedad

β Coeficiente de expansión volumétrica

ΔT	Variación de temperatura
α	Difusividad térmica
γ	Viscosidad cinemática
L_c	Longitud característica (espacio anular)

Analizando esta ecuación tenemos como primer término la gravedad que es una constante cuyo valor es 9.81 m/s^2 . El coeficiente de expansión volumétrica, la difusividad térmica y la viscosidad cinemática son propiedades de cada fluido y que también van a depender de la temperatura a la que se le analice, en nuestro caso vamos a experimentar hasta máximo unos $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

En función de esta temperatura máxima, el coeficiente de expansión volumétrica para los fluidos tiene un valor que está en el rango de 10^{-3} . La difusividad térmica depende de la conductividad térmica, el calor específico y la densidad, y para los fluidos este valor está en el rango de 10^{-7} y 10^{-8} . Por último la viscosidad cinemática no tiene un rango fijo como los dos anteriores propiedades, pero para el agua y la glicerina que son los fluidos a testear tenemos que está en el rango de 10^{-7} para el agua y 10^{-3} para la glicerina.

Si asumimos el valor de 1 para cada una de estas propiedades y consideramos el caso del agua que sería el más crítico por su viscosidad cinemática y le multiplicamos con la gravedad tenemos:

$$Ra = 9.81 * 10^{11} * \Delta T * Lc^3 \quad [15]$$

Nosotros estamos asumiendo un espacio anular de 2.5mm, transformándole a metros tenemos $2.5 * 10^{-3} \text{ m}$ y si este valor lo elevamos al cubo tenemos $1.56 * 10^{-8} \text{ m}^3$. Este sería el valor de la longitud característica, con lo que nos queda:

$$Ra = 9.81 * 10^{11} * \Delta T * 1.56 * 10^{-8} = 15303.6 * \Delta T = 1.53 * 10^4 * \Delta T \quad [16]$$

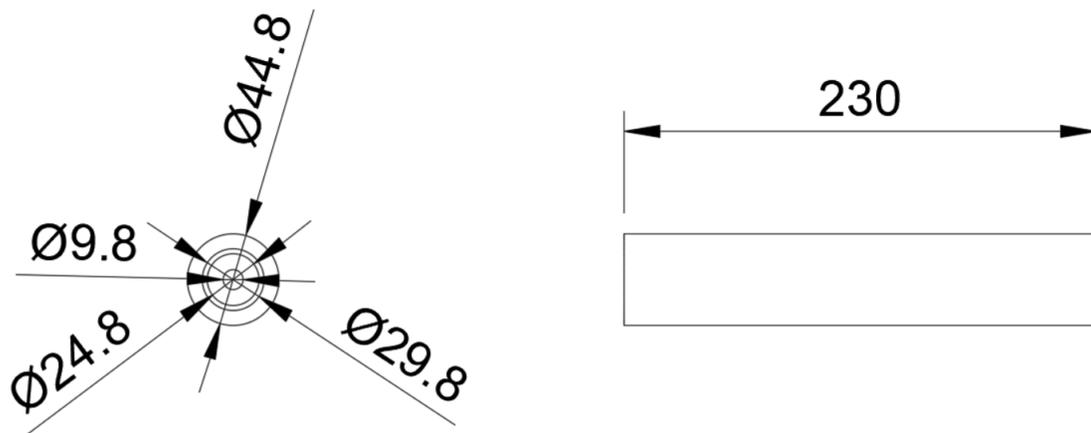
En la investigación de (Costa B., Silva, & Vieira M.) determinan que para un número de Rayleigh en un rango de 10^5 , la convección natural empieza a predominar. Esto quiere decir

que para nuestro caso deberíamos tener una variación de temperatura cercana a 10 °C para que la convección natural predomine sobre la conducción, algo que no va a suceder ya que, dentro de las consideraciones de diseño se tiene que deben ser variaciones de temperatura de hasta un máximo de 3 °C. De esta forma podemos demostrar que en este espacio anular de 2.5mm va a predominar la conducción sobre la convección natural, para el rango de temperaturas que se va a experimentar.

Con esta configuración, las dimensiones de los cilindros quedaron como se indica en la Figura 7 y se los construyó basados en la hoja de procesos y planos que están en la sección Anexos.

Figura 7

Dimensiones de los cilindros concéntricos



Diseño de las tapas

Análisis de materiales

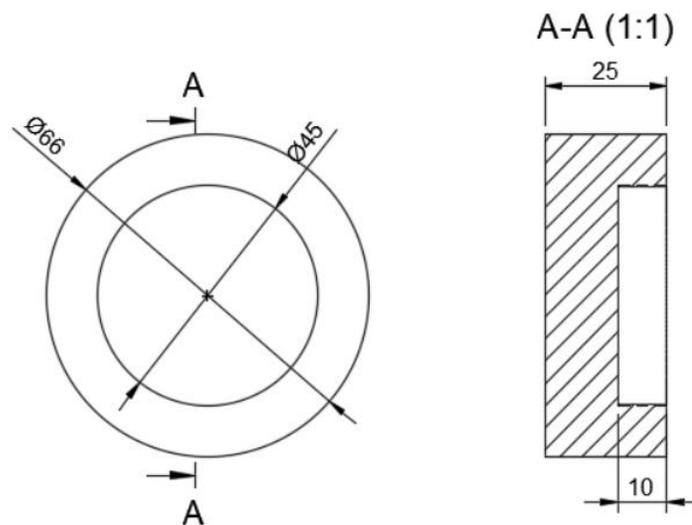
Para la tapa de los cilindros se seleccionó el duralón por ser un material de fácil mecanizado, económico y de una amplia variedad en el mercado local y que además al ser un material polimérico tiene una conductividad térmica baja ($0.30 \text{ W/m}^*\text{K}$), que cumple con las condiciones de diseño antes planteadas.

Análisis de diseño

Se diseñaron dos tapas de 66mm de diámetro y 25mm de ancho y con un orificio en su centro para que sea acoplado con el cilindro externo (Ver Figura 8). Este orificio tiene como diámetro el diámetro exterior del cilindro externo, es decir 45mm y tiene una profundidad de 10mm. La hoja de procesos y plano de este elemento están en la sección Anexos.

Figura 8

Dimensiones de las tapas



Diseño de soporte de ensamble

Análisis de materiales

Para la selección del material de este componente, debemos considerar que este forma parte de un conjunto con los cilindros y tapas y por ende va a estar sumergido en el agua, por lo que el material a seleccionar debe ser un material que no se oxide fácilmente, para que de esta forma podamos garantizar una alta durabilidad del equipo. Por esta razón se escogió acero inoxidable.

Análisis de diseño

El objetivo de este componente es el poder brindar un ensamble más seguro y hermético entre las tapas y los cilindros. Con esta condición se diseñaron dos placas circulares de 102mm de diámetro, con 4 agujeros pasantes dispuestos y equidistantes (ver Figura 9).

Cada una de estas placas se colocan en los extremos de las tapas y mediante 4 ejes roscados de 325mm de largo y M10 se puede ajustar y regular el conjunto tapas-cilindros (ver Figura 10).

Para el mecanizado y construcción de estos componentes se utilizaron las hojas de procesos y planos que se encuentran en la sección de Anexos

Figura 9

Disposición de los agujeros de la estructura de centrado

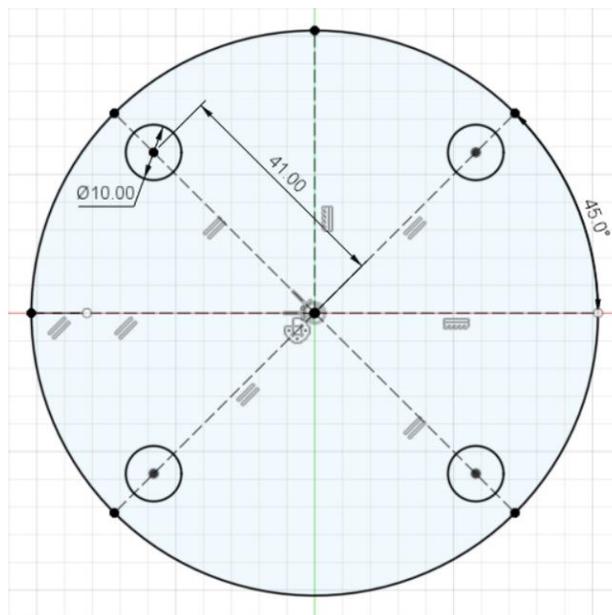
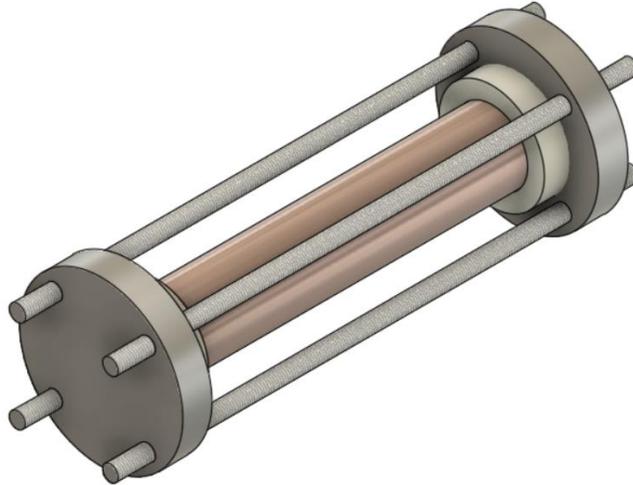


Figura 10

Ensamble estructura de centrado y conjunto tapas-cilindros



Diseño del tanque

Análisis de materiales

La función principal del tanque es almacenar el fluido donde se va a sumergir el sistema de cilindros concéntricos, según las consideraciones de diseño este fluido puede ser agua o aceite en nuestro caso decidimos utilizar agua. En base a esta consideración, el material más óptimo para el diseño del tanque es el acero inoxidable ya que va a estar constantemente lleno de agua y de esta manera se logra mantener en óptimas condiciones.

Análisis de diseño

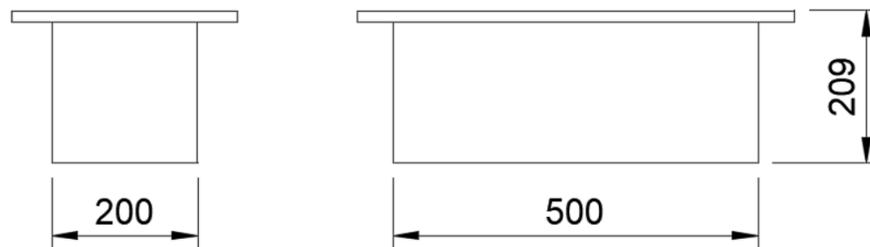
El tanque debe cumplir con dos funciones primordiales. La primera es almacenar al sistema de cilindros concéntricos, que este sistema pueda ser manipulado sin inconvenientes al interior del tanque y la segunda función es que el fluido que va a contener este tanque varíe su temperatura en función de la temperatura del cilindro externo y que además no pierda calor para que se pueda mantener constante.

Considerando la primera restricción, se diseñó un tanque de 500mm de largo, 200mm de ancho y 210mm de profundidad, con una chapa de 3mm de espesor (ver Figura 11). Con

estas dimensiones la celda de cilindros concéntricos entraba en el tanque con holgura y se podía manipular sin ningún problema.

Figura 11

Dimensiones tanque interno

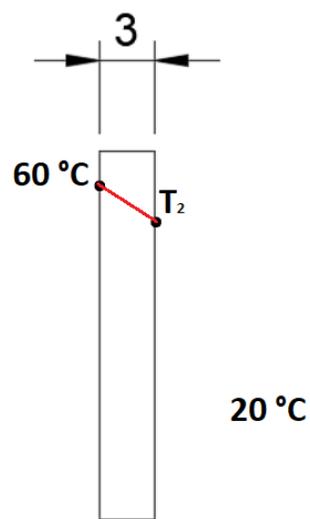


Para que el fluido en el interior del tanque varíe su temperatura, se insertó en la base una resistencia de 1000 watts de potencia que sería la encargada de calentar todo el fluido.

Para que la temperatura de este fluido no pierda calor con el ambiente exterior, se realizó el análisis de transferencia de calor para determinar la necesidad o no de implementar un aislante térmico. Para lo cual se realizó el siguiente análisis térmico

Figura 12

Esquema de transferencia de calor de la chapa metálica



Partimos de una temperatura máxima de 60°C que tendría el tanque en su interior (ver Figura 12) y asumiendo que esa temperatura es la misma en el metal, esa asunción se la hace simplemente para facilidad de cálculo. Afuera del tanque se asume como temperatura ambiente de 20 °C.

Este sería un caso de transferencia de calor por conducción unidireccional en estado estacionario, por lo que se lo puede analizar por el método de resistencias.

$$R_1 = \frac{L}{K * A} = \frac{3 * 10^{-3} m}{16.3 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} * 0.2 m * 0.21 m}$$

$$R_1 = 4.3821 * 10^{-3} \text{ } ^\circ C/W \quad [17]$$

La primera resistencia equivale a la conducción de calor que existe a través de los 3mm de espesor de la chapa metálica.

$$R_2 = \frac{1}{h * A} = \frac{1}{10 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * 0.20 m * 0.21 m}$$

$$R_2 = 2.381 \text{ } ^\circ C/W \quad [18]$$

La segunda resistencia equivale a la convección de calor que existe entre el exterior de la chapa metálica y el ambiente.

$$R_T = R_1 + R_2$$

$$R_T = 2.3854 \text{ } ^\circ C/W \quad [19]$$

Con la suma de las dos resistencias, se puede calcular la razón de transferencia de calor a través de la chapa metálica de la siguiente forma:

$$Q = \frac{T_1 - T_\infty}{R_T} = \frac{60 \text{ } ^\circ C - 20 \text{ } ^\circ C}{2.3854 \text{ } ^\circ C/W}$$

$$Q = 16.769 W \quad [20]$$

Si se conoce la razón de transferencia de calor a través de la chapa metálica, se puede determinar la temperatura externa T_2 de la chapa metálica de la siguiente manera:

$$Q = \frac{60 - T_2}{R_1}$$

$$16.769 \text{ W} = \frac{60 \text{ }^\circ\text{C} - T_2}{4.3821 * 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/W}}$$

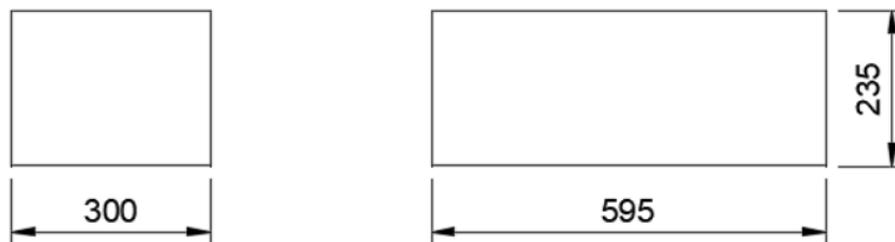
$$T_2 = 59.93 \text{ }^\circ\text{C} \quad [21]$$

En base a estos resultados podemos concluir que existe una transferencia de calor directa a lo largo de la chapa metálica por lo cual existe una pérdida de energía con el ambiente por lo que si es necesario añadir una capa de aislante térmico para que la temperatura interna del tanque se pueda mantener constante.

Se decidió utilizar como aislante térmico una plancha de fibra de vidrio de 3cm de espesor, esta plancha se la colocó en la base y laterales del tanque y además se diseñó otro tanque exterior que almacene al tanque con el aislante térmico. Este tanque exterior quedó de 595mm de largo, 300mm de ancho y 235mm de altura (ver Figura 13).

Figura 13

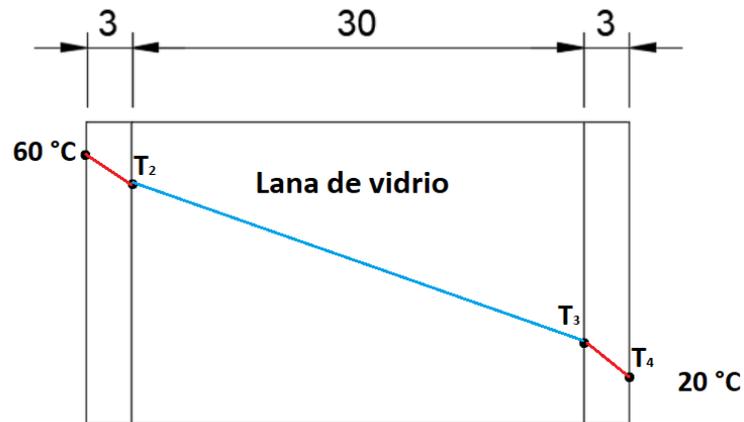
Dimensiones tanque externo



Con este aislante térmico y el tanque exterior, el análisis de transferencia de calor queda de la siguiente forma.

Figura 14

Esquema de transferencia de calor multicapas (chapas metálicas y fibra de vidrio)



Partimos de las mismas consideraciones del caso anterior, es decir temperatura interna de 60 °C y temperatura ambiente de 20 °C, este también es un caso de transferencia de calor unidireccional en estado estacionario, pero de multicapas (ver Figura 14), por lo que se puede utilizar la misma metodología de cálculo.

$$R_1 = \frac{L_1}{K_1 * A} = \frac{3 * 10^{-3} m}{16.3 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} * 0.2 m * 0.21 m}$$

$$R_1 = 4.3821 * 10^{-3} \text{ } ^\circ C/W \quad [22]$$

La primera resistencia equivale a la conducción de calor que existe a través de los 3mm de espesor de la chapa metálica.

$$R_2 = \frac{L_2}{K_2 * A} = \frac{0.30 m}{0.03 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} * 0.2 m * 0.21 m}$$

$$R_2 = 238.095 \text{ } ^\circ C/W \quad [23]$$

La segunda resistencia equivale a la conducción de calor que existe a través de los 3cm de espesor de la fibra de vidrio.

$$R_3 = R_1 = 4.3821 * 10^{-3} \text{ } ^\circ C/W \quad [24]$$

La tercera resistencia es igual a la primera ya que es el mismo análisis de transferencia de calor que existe a través de la chapa metálica, pero en este caso es del tanque exterior.

$$R_4 = \frac{1}{h * A} = \frac{1}{10 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * 0.2 m * 0.2 m}$$

$$R_4 = 2.381 \text{ } ^\circ C/W \quad [25]$$

La cuarta resistencia equivale a la convección de calor que existe entre el exterior de la chapa metálica y el ambiente

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_T = 240.4848 \text{ } ^\circ C/W \quad [26]$$

Con la suma de las cuatro resistencias, se puede calcular la razón de transferencia de calor a través de las dos chapas metálicas y la fibra de vidrio de la siguiente forma:

$$Q = \frac{T_1 - T_\infty}{R_T} = \frac{60 \text{ } ^\circ C - 20 \text{ } ^\circ C}{240.4848 \text{ } ^\circ C/W}$$

$$Q = 0.1663 \text{ } W \quad [27]$$

Si se conoce la razón de transferencia de calor a través de las distintas capas, se puede determinar la temperatura externa T_4 de la chapa metálica del tanque exterior de la siguiente manera:

$$Q = \frac{60 \text{ } ^\circ C - T_4}{R_1 + R_2 + R_3}$$

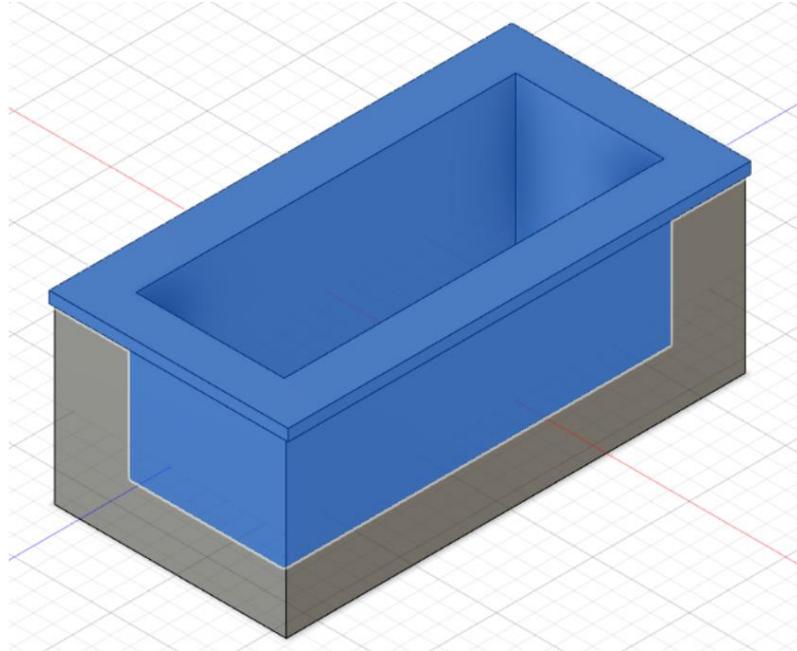
$$0.1663 \text{ } W = \frac{60 \text{ } ^\circ C - T_4}{238.1038 \text{ } ^\circ C/W}$$

$$T_4 = 20.4 \text{ } ^\circ C \quad [28]$$

Con este análisis queda comprobado que la capa de fibra de vidrio de 3cm cumple su función de aislar térmicamente el tanque y el ensamble de los dos tanques queda como se indica en la Figura 15.

Figura 15

Ensamble del tanque interno y externo

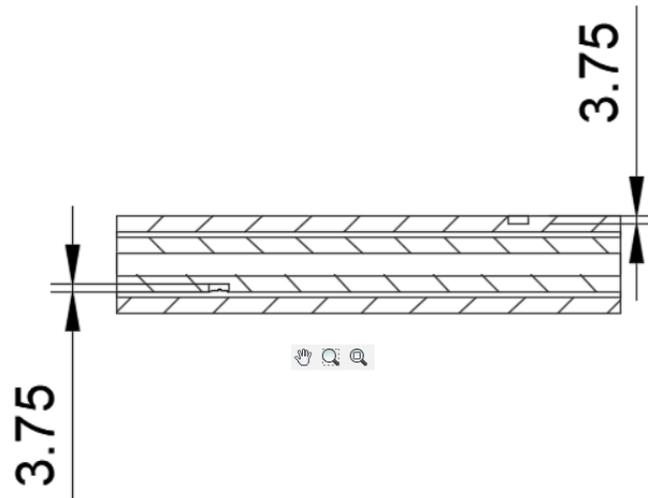


Elementos complementarios

Todo el conjunto en sí de los cilindros concéntricos y el tanque deben estar asociados a varios elementos adicionales que permitan el funcionamiento en sí de todo el sistema y de esta forma se pueda realizar la experimentación.

Termocuplas

Para medir la temperatura del cilindro interno y externo se utilizó dos termocuplas tipo tornillo J, que a su vez están conectadas a un dispositivo de lectura de datos que nos permite obtener valores de hasta 1 décima de grado. Estas termocuplas fueron colocadas a 47mm de los extremos de los cilindros, pero cada una fue colocada a una profundidad diferente. Una termocupla fue colocada en la mitad del espesor del cilindro interno, mientras que la segunda fue colocada a la mitad del espesor del cilindro externo (ver Figura 16). Todos estos detalles de cómo se deben colocar las termocuplas se encuentran especificados en los planos en la sección de Anexos.

Figura 16*Disposición de las termocuplas*

Decidimos utilizar únicamente dos termocuplas y en esa ubicación por varias razones. Primero, ya que en todas las investigaciones encontradas recomiendan colocar solamente una termocupla en cada cilindro, ya que realizan un análisis comparativo de las áreas de transferencia de calor para el caso axial y radial y concluyen que como el área para la transferencia de calor radial es mucho más grande que el área para la transferencia de calor axial y como además los extremos están aislados, los gradientes de temperatura en la dirección axial son despreciables y además para tener una medición aún más confiable, toman la temperatura en la mitad del espesor del cilindro y de forma opuesta cada termocupla.

Nosotros decidimos realizar este mismo análisis de las áreas para la transferencia de calor radial y axial. Para la transferencia de calor axial tenemos que el área es igual a:

$$A_a = \pi r^2 = 19.63 \text{ mm}^2$$

Mientras que el área para la transferencia de calor radial es:

$$A_r = 2\pi r l = 3141.6 \text{ mm}^2$$

Con este análisis comprobamos lo planteado en las investigaciones, el área para la transferencia de calor radial es 160 veces más grande que el área para la transferencia de calor axial y como además utilizamos dos tapas en los extremos, podemos despreñar la transferencia de calor axial.

Además de este análisis nosotros decidimos realizar otro más teórico y lógico. Nuestro análisis parte de donde se encuentra nuestra fuente generadora de calor, es decir el elemento calefactor, esta fuente se encuentra en el interior del cilindro más pequeño y tiene la misma longitud que el cilindro por lo que nosotros podemos concluir que toda esta longitud se va a calentar de manera uniforme y nuestro estudio se debe basar en cómo varía la temperatura de forma radial, ya que el flujo de calor es desde el interior del cilindro hacia el exterior, por eso no es necesario colocar más termocuplas a lo largo de cada uno de los cilindros y decidimos utilizar la recomendación de las investigaciones de la ubicación de estas, es decir que estén opuestas entre ellas a una distancia igual de los extremos de los cilindros.

La medición de estas termocuplas se puede visualizar en los indicadores de la izquierda y derecha del panel de control, si se lo observa de frente. En el indicador de la izquierda está la temperatura del cilindro interno y en el indicador de la derecha está la temperatura del cilindro externo.

Para medir la temperatura en el tanque también fue necesario incluir termocuplas. Decidimos utilizar dos termocuplas, una termocupla fija colocada en la mitad del largo y ancho de los cilindros y a 2 centímetros de separación del cilindro. Esta temperatura se la puede visualizar en el indicador de la mitad del panel del control

Y una termocupla móvil, esta termocupla nos permitió comprobar que en todos los puntos del tanque se tiene una misma temperatura con una variación máxima de 0.5 °C. Esta temperatura está en el indicador ubicado en la parte superior del panel de control.

Resistencia del tanque

Para que la temperatura del agua que está en el tanque pueda ser la misma que la temperatura del cilindro exterior era necesario incluir un elemento calefactor. Para determinar este componente nos basamos en una metodología experimental ya que no consistía únicamente en determinar la potencia de una resistencia que caliente el volumen de agua que estaba contenido en el tanque, ya que debíamos considerar que el sistema de cilindros concéntricos iba a estar sumergido en este tanque y si la resistencia era muy potente, afectaba a los cilindros calentándolos, lo cual no era deseado.

Iniciamos nuestra selección con una resistencia que nos recomendó el proveedor en base al volumen de agua a ser calentado y además a que se tenía un movimiento del agua gracias a la bomba. Esta resistencia era de 2500 vatios, la cual, si nos permitía calentar el agua de forma rápida y con la ayuda de la bomba se tenía la misma temperatura en el tanque, sin embargo, esta resistencia transfería calor hasta el cilindro externo, algo que no se deseaba que suceda por lo que se decidió cambiar de resistencia.

La segunda resistencia que se utilizó fue una de 1200 vatios de potencia, con esta potencia y con la ayuda de la bomba logramos calentar el agua del tanque y que la temperatura sea la misma en todos los puntos, evidentemente esto se lo realizaba de una forma más lenta en comparación con la anterior resistencia, sin embargo este factor no lo consideramos tan importante ya que se lo podía corregir mediante experimentación determinando el instante exacto en el que se debe encender esta resistencia.

Bomba para el tanque

Para asegurarnos que la temperatura del agua dentro del tanque sea la misma en cualquier punto, se necesitaba que exista un movimiento del fluido para que se mezcle el fluido que se estaba calentado y el que se encontraba a una menor temperatura. Para esto se lo podía realizar de dos formas.

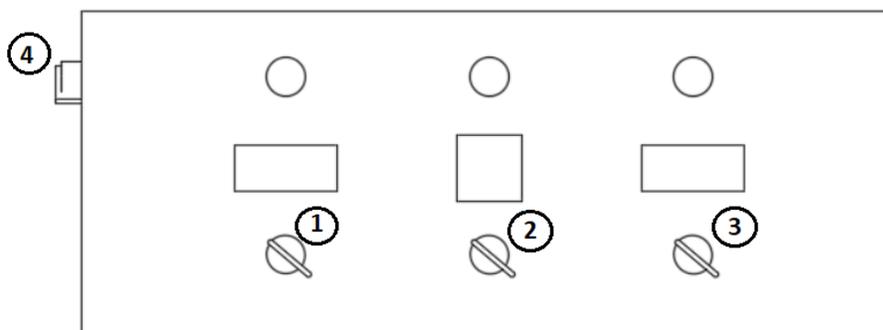
La primera consistía en implementar un agitador manual o implementar una bomba, decidimos utilizar esta segunda opción ya que como se deben tomar los datos de la experimentación, la persona que iba a utilizar el equipo no iba a poder estar agitando el fluido del tanque mientras realiza la toma de datos y pues con la bomba se puede optimizar este proceso. Para cumplir con esta función se seleccionó una bomba para acuario que tiene una potencia de 15 vatios y un flujo de 880 L/H.

Panel de control

Todos los elementos que requieren energía eléctrica que se están utilizando, es decir, las termocuplas, resistencias, indicadores de temperatura y bomba, trabajan con 110 V por lo que se optó por conectar todos estos a las borneras y junto a un contactor para que se pueda energizar a todos estos elementos con solamente una conexión. Gracias a que se utilizaron estos elementos eléctricos también se pudo establecer cuatro switches para el encendido y apagado de los diferentes sistemas.

Figura 17

Distribución del panel de control



Tomando como referencia la Figura 17 tenemos que el primer switch sirve para encender el indicador de la temperatura del cilindro interno, el segundo switch sirve para encender la resistencia interna y el indicador de la temperatura del tanque, el tercer switch sirve

para encender la bomba y el indicador de la temperatura del cilindro externo, finalmente el cuarto switch sirve para encender la resistencia del tanque.

Especificaciones del equipo

En base a todo el análisis de materiales y de diseño realizado anteriormente se desarrolló el diseño y la construcción del equipo, con lo que finalmente el equipo quedó como se indica en Figura 18 y cada uno de las partes se encuentra detallado en la Tabla 6

Figura 18

Esquema del equipo para medir la conductividad térmica de un fluido

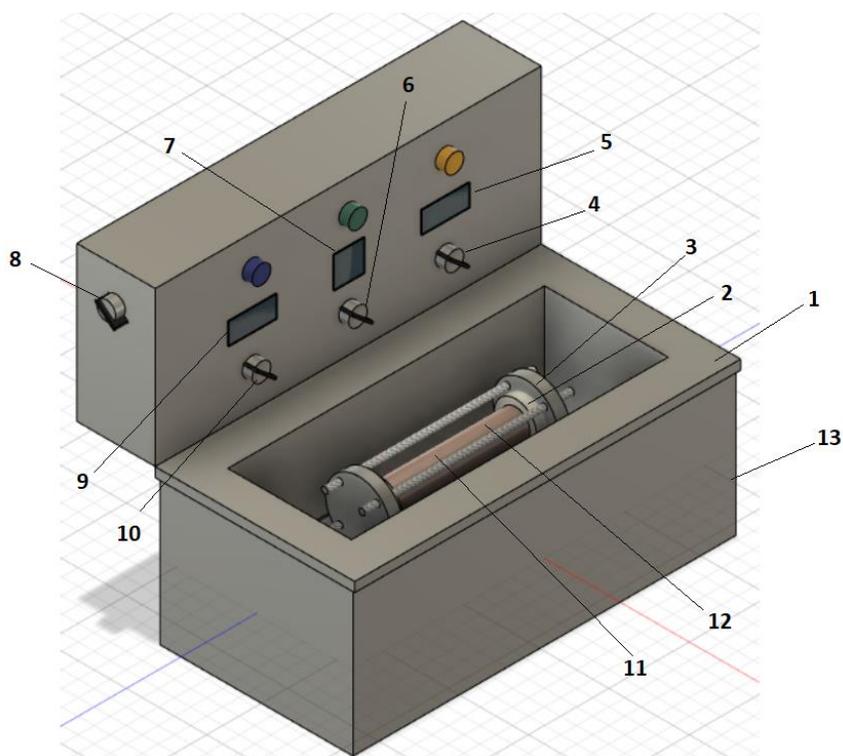


Tabla 6

Detalle de los elementos del equipo

Nro.	Elemento
------	----------

1	Tanque interno
2	Tapas de duralón
3	Sistema de ensamble
4	Switch de la bomba y medidor de temperatura del cilindro externo
5	Indicador de la temperatura del cilindro externo
6	Switch de la resistencia interna y medidor de temperatura del tanque
7	Indicador de la temperatura del tanque
8	Switch de la resistencia del tanque
9	Indicador de la temperatura del cilindro interno
10	Switch del medidor de la temperatura del cilindro interno
11	Cilindro externo de cobre
12	Cilindro interno de cobre
13	Tanque externo

Una vez detallado el diseño final del equipo y todos los elementos que lo componen es muy importante definir cuáles son las condiciones de uso o las especificaciones técnicas del equipo, para de esta manera garantizar un correcto uso y funcionamiento.

Previo a encender el equipo se debe llenar el espacio anular con 38ml del fluido a testear y posteriormente se debe llenar el tanque con 20.9lts de agua para el caso que se vaya a realizar una experimentación con temperaturas menores al punto de ebullición del agua, es decir 100°C o 20.9lts de aceite para el caso que se vaya a trabajar en temperaturas más elevadas.

Primeramente, para el encendido de los componentes deben ser en el orden detallado, es decir primero el switch que enciende la bomba y el indicador de la temperatura del cilindro externo, posterior el switch del indicador de la temperatura del cilindro interno y finalmente el switch de la resistencia de los cilindros y del indicador de la temperatura del tanque.

Otros puntos a considerar muy importantes son que todos los elementos eléctricos del equipo funcionan con 110 voltios, las termocuplas tienen una apreciación de 0.1 °C

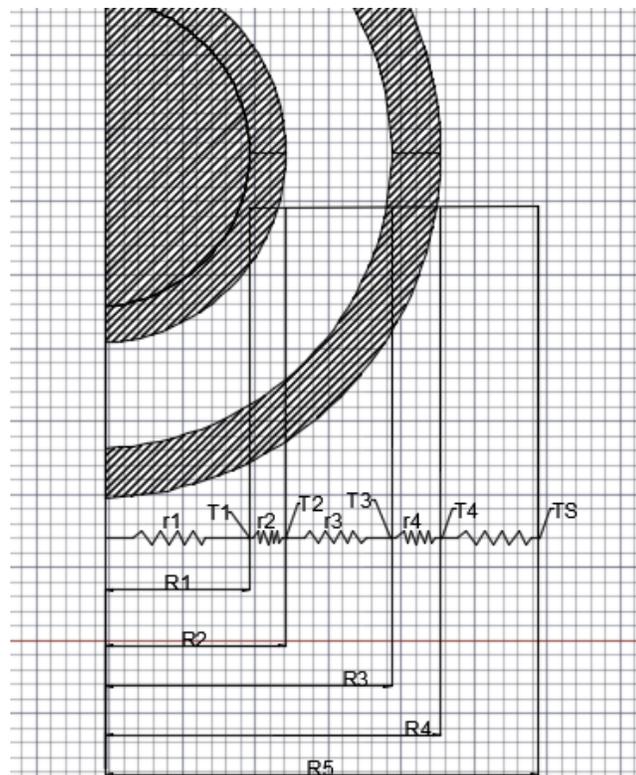
Desarrollo del modelo matemático

Se representa la solución analítica del experimento tomando en cuenta la hipótesis de que no ocurre la convección natural dentro del fluido, al limitar el espacio anular de espesor máximo a 3 mm del líquido testeado se comporta como un sólido, por lo tanto, la transferencia del calor principal es por conducción.

Utilizando el concepto de resistencia térmica podemos analizar la transferencia de calor que ocurre en el sistema ya que existe una analogía entre la difusión de calor y la carga eléctrica. (ver Figura 19)

Figura 19

Conducción en estado estable del sistema (cilindros concéntricos)



Como se puede observar existen 5 resistencias térmicas en el sistema. Teniendo en cuenta que cada una simboliza una variación de temperatura en sus fronteras.

Donde,

$r1 = \text{resistencia } 1$

$r2 = \text{resistencia } 2$

$r3 = \text{resistencia } 3$

$r4 = \text{resistencia } 4$

$R1 = \text{radio } 1$

$R2 = \text{radio } 2$

$R3 = \text{radio } 3$

$R4 = \text{radio } 4$

$R5 = \text{distancia hacia el exterior}$

$k_{\text{cobre}} = \text{constante de conductividad térmica del cobre}$

$k_{\text{fluido}} = \text{constante de conductividad térmica del fluido en el espacio anular}$

Para calcular las diferentes resistencias se debe analizar qué tipo de transferencia de calor existe en el sistema.

Para la ecuación [29] y [31] se analiza la transferencia de calor en los espesores de los cilindros de cobre que para esta parte del equipo se trataría de un caso de transferencia de calor por conducción.

Para la ecuación [30] es la parte primordial del experimento ya que en este pequeño espacio anular existe de igual forma transferencia de calor por conducción y si se mantiene el sistema controlado y con las consideraciones de diseño establecidas se puede evitar la transferencia de calor por convección, por lo tanto, se puede asumir que este cálculo sea únicamente un caso de conducción, siendo la constante de conductividad térmica del fluido a testear nuestra variable a encontrar.

$$r2 = \frac{\ln \frac{R2}{R1}}{2 * \pi * k_{\text{cobre}}} \quad [29]$$

$$r3 = \frac{\ln \frac{R3}{R2}}{2 * \pi * k_{\text{fluido}}} \quad [30]$$

$$r_4 = \frac{\ln \frac{R_4}{R_3}}{2 * \pi * k_{cobre}} \quad [31]$$

El circuito al estar en serie la resistencia total es igual a la suma de las tres resistencias existentes.

$$R_t = r_2 + r_3 + r_4 \quad [32]$$

El calor total se calcula de la forma:

$$q_{total} = \frac{T_e - T_i}{R_t} \quad [33]$$

Reemplazando las ecuaciones [29], [30] y [31] en [32] nos queda;

$$R_t = \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{2 * \pi * k_{cobre}} + \frac{\ln \frac{R_3}{R_2}}{2 * \pi * k_{fluido}} + \frac{\ln \frac{R_4}{R_3}}{2 * \pi * k_{cobre}} \quad [34]$$

Reemplazando la ecuación [34] en la ecuación [33] tenemos;

$$q_{total} = \frac{T_4 - T_1}{\frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{2 * \pi * k_{cobre}} + \frac{\ln \frac{R_3}{R_2}}{2 * \pi * k_{fluido}} + \frac{\ln \frac{R_4}{R_3}}{2 * \pi * k_{cobre}}} \quad [35]$$

De esta ecuación la variable a encontrar es la conductividad térmica del fluido entre los cilindros de cobre (k_{agua}). La conductividad del cobre (k_{cobre}) es una variable conocida y los diferentes radios de igual forma son datos de la geometría del sistema.

Despejando la conductividad térmica del fluido tenemos:

$$k_{fluido} = \frac{\ln \frac{R_3}{R_2}}{2 * \pi * \left(\frac{T_1 - T_4}{q_{total}} + \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{2 * \pi * k_{cobre}} + \frac{\ln \frac{R_4}{R_3}}{2 * \pi * k_{cobre}} \right)} \quad [36]$$

Esta es la ecuación que se utilizará para calcular la conductividad térmica en base a las temperaturas obtenidas con la experimentación.

Adicionalmente en (Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975) y (Giraldo-Gómez, Gabas, Telis Nicoletti, & Telis-Romero, 2010) utilizan la Ley de Fourier para determinar la ecuación de calor

por conducción y de esta despejar la conductividad térmica con lo que finalmente les queda la siguiente ecuación

$$k = \dot{q} * \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{2 * \pi * (T_1 - T_2)} \quad [37]$$

Donde,

\dot{q} Flujo de calor

R_2 Radio interno del cilindro externo

R_1 Radio externo del cilindro interno

T_1 Temperatura del cilindro interno

T_2 Temperatura del cilindro externo

En nuestro estudio vamos a considerar esta ecuación para determinar la conductividad térmica en base a los resultados de la experimentación y para también poder comprar con la ecuación que se determinó por el método de resistencias térmicas.

Capítulo IV

Experimentación y análisis de resultados

Mediciones realizadas en el equipo

Las mediciones realizadas se dividieron en dos partes principales, porque se testeó la conductividad térmica de dos fluidos; la primera parte es la medición de la conductividad térmica del agua destilada teniendo en cuenta que la variable a encontrar es de forma indirecta, es decir, el equipo cuantifica la temperatura externa e interna del fluido mediante dos termocuplas orientadas estratégicamente en los cilindros. Y la segunda parte es la medición de la conductividad térmica de la glicerina que es realizada de igual forma que la primera parte.

Configuración y preparación del equipo

Para el desarrollo de todos los experimentos se tomaron mediciones de los fluidos que se va a testear en la máquina. En la entrada del equipo, el agua destilada y la glicerina, se tuvo un volumen de 38ml.

El tanque que se utiliza en este experimento, es un tanque de acero inoxidable que está recubierto de una esponja de aislación térmica, y el tanque debe estar completamente lleno de agua. La temperatura del tanque tendrá variaciones conforme el experimento avanza, por lo tanto, se coloca dos termocuplas una fija y la otra variable para poder comprobar que la temperatura en todo el tanque sea la misma. Utilizando una resistencia de 1200 W se logró mantener que la temperatura externa del cilindro sea la misma o muy cercana a la del tanque, por lo tanto, no existe transferencia de calor entre los cilindros concéntricos al tanque lleno de agua.

Se tapa el tanque y se enciende la máquina el primer switch enciende la termocupla del cilindro interior, el segundo switch enciende la termocupla fija del tanque y la resistencia interna y el tercer switch enciende la bomba y la termocupla del cilindro externo. Y el switch de la parte superior izquierda de la máquina controla el encendido de la resistencia de 1200 W del tanque.

Al iniciar la máquina, la temperatura del fluido a testear tiene la tendencia a igualar a la mayor temperatura que por lo general, es la del tanque. Este proceso de transición ocurre aproximadamente en 3 grados centígrados.

Una vez concluido todas las configuraciones del equipo se procede a la toma de datos en la siguiente sección.

Ejemplo de cálculos

Utilizando la ecuación [37] de (Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975) y (Giraldo-Gómez, Gabas, Telis Nicoletti, & Telis-Romero, 2010) se puede calcular la conductividad térmica del agua destilada. Los datos geométricos se especifican en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Se utilizará solo una parte de los datos obtenidos en el experimento 1 como se indica en la Tabla 8.

Tabla 7

Datos geométricos de los cilindros concéntricos

Radio exterior	14,9 mm
Radio interior	12,4 mm
Longitud del cilindro	0,2 m

Tabla 8

Datos experimentales de la conductividad del agua, utilizando el método propuesto por (Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975) y (Giraldo-Gómez, Gabas, Telis Nicoletti, & Telis-Romero, 2010)

T interna	T externa	K (conductividad térmica)	ΔT	Error absoluto	Error relativo
35,1	34,5	0,585	0,6	0,022	3,686
35,2	34,6	0,585	0,6	0,022	3,686
35,3	34,7	0,585	0,6	0,022	3,686
35,4	34,8	0,585	0,6	0,022	3,686

35,5	34,9	0,585	0,6	0,022	3,686
35,7	35	0,501	0,7	0,106	17,446
35,7	35,1	0,585	0,6	0,022	3,686
35,8	35,2	0,585	0,6	0,022	3,686
35,9	35,2	0,501	0,7	0,106	17,446
36	35,3	0,501	0,7	0,106	17,446
36	35,4	0,585	0,6	0,022	3,686

Como primer paso se calcula la generación de calor por metro, que produce la resistencia térmica que está en el cilindro interno el dato del fabricante de la resistencia térmica es de $60 \frac{W}{m^2}$, la longitud es de 0.2 metros, para lo cual se utiliza la ecuación [38].

$$\dot{q} = q \cdot L = 60 \cdot 0.2 = 12 \left[\frac{W}{m} \right] \quad [38]$$

Con la potencia de la resistencia térmica es posible reemplazar las propiedades geométricas del equipo y los deltas de temperatura que se producen en el experimento en la ecuación [37], el resultado se puede observar en la ecuación [39].

$$k_{agua} = 12 \frac{\ln \frac{14.9}{12.4}}{2 * \pi * (35.4 - 34.8)} = 0.584 \left[\frac{W}{^{\circ}C * m} \right] \quad [39]$$

A continuación, se obtendrán los errores; en la ecuación [40] se calcula el error absoluto mientras que el error relativo en la ecuación [41] para esto se necesita el valor teórico de la conductividad térmica que es 0.607 [W/K*m] y el experimental obtenido en este trabajo como se puede observar con un ΔT de 0.6 °C es el mejor valor para encontrar la conductividad térmica.

$$\% \text{ Error Absoluto} = |\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}| * 100\%$$

$$\% \text{ Error Absoluto} = |0.607 - 0.584| = 0.022 \frac{W}{^{\circ}C * m} \quad [40]$$

$$\% \text{ Error Relativo} = \frac{\% \text{ Error Absoluto}}{\text{Valor teórico}} = 3.789\% \quad [41]$$

En esta segunda parte se ejemplifica los cálculos de la conductividad térmica de la glicerina se utiliza la ecuación [36] que se basa en la teoría de resistencias eléctricas. Como la

cantidad de datos es demasiado extensa se tomará una parte del experimento 1 (ver Tabla 10). Los datos geométricos que se requieren son los radios internos (R1 y R2) y externos (R3 y R4) de los cilindros concéntricos además de la longitud conductora (ver Tabla 9). Otro dato que se necesita para esta formulación es la conductividad térmica del cobre. La variación de temperatura son los datos obtenidos en el equipo.

Como primer paso se calcula la generación de calor por metro, que produce la resistencia térmica que está en el cilindro interno el dato del fabricante de la resistencia térmica es de $60 \frac{W}{m^2}$ la longitud conductora de 0.2 metros, para lo cual se utiliza la ecuación [38].

$$\dot{q} = \ddot{q}L = 60 * 0.2 = 12 \left[\frac{W}{m} \right] \quad [42]$$

Tabla 9

Datos geométricos y constantes utilizadas para el cálculo de la conductividad térmica de un fluido

R4	22,4 mm
R3	14,9 mm
R2	12,4 mm
R1	4,9 mm
K cobre	400 W/m°C
Longitud del cilindro	0,2 m

Tabla 10

Parte de los datos generados en el equipo para la glicerina

Ti	To	k	ΔT	error absoluto	error relativo
17,7	16,6	0,319	1,1	0,035	12,284
17,8	16,7	0,319	1,1	0,035	12,284
17,9	16,7	0,292	1,2	0,008	2,927
17,9	16,8	0,319	1,1	0,035	12,284
18	16,9	0,319	1,1	0,035	12,284
18,1	16,9	0,292	1,2	0,008	2,927
18,2	17	0,292	1,2	0,008	2,927

$$k_{glicerina} = \frac{\ln \frac{14.9}{12.4}}{2 * \pi * \left(\frac{17.9 - 16.7}{12} + \frac{\ln \frac{12.4}{4.9}}{2 * \pi * 400} + \frac{\ln \frac{22.4}{14.9}}{2 * \pi * 400} \right)} = 0.292 \left[\frac{W}{^{\circ}C * m} \right] \quad [43]$$

A continuación, se obtendrán los errores; en la ecuación [40] se calcula el error absoluto mientras que el error relativo en la ecuación [41] para esto se necesita el valor teórico de la conductividad térmica que es 0.284 [W/K*m] y el experimental obtenido en este trabajo. Los resultados se observan en la ecuación [44] y [45].

$$\% \text{ Error Absoluto} = |\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}| * 100\%$$

$$\% \text{ Error Absoluto} = |0.284 - 0.292| = 0.008 \frac{W}{^{\circ}C * m} \quad [44]$$

$$\% \text{ Error Relativo} = \frac{0.831}{0.284} = 2.927\% \quad [45]$$

Resultados obtenidos de los procesos experimentación

Los resultados de la experimentación realizada en el banco de pruebas son un promedio de 300 a 400 datos por cada experimento, como existe una gran cantidad de datos, para ordenar, caracterizar y almacenar los datos se utiliza la estadística descriptiva, siendo más específico la Regla de Sturges que nos permite que los datos se agrupen en intervalos.

Se realizó tres experimentos para obtener repetitividad en los resultados, los datos obtenidos del agua destilada utilizando el primer método se detallan en la Tabla 11. El segundo método para calcular la conductividad térmica se detalla en la Tabla 12). La unión de los experimentos del agua destilada se realiza por medio de un gráfico para cada método (ver Figura 20 y Figura 21).

Tabla 11

Cálculo de la conductividad térmica del agua destilada. Utilizando el primer método

Experimento 1

Intervalo de clase	K exp_promedio	K Teórico	Error Absoluto	Error Relativo
1 [12,16)	0,692	0,607	0,085	14,003
2 [16;20)	0,438	0,607	0,169	27,842
3 [20;24)	0,475	0,607	0,132	21,746
4 [24;28)	0,484	0,607	0,123	20,264
5 [28;32)	0,452	0,607	0,155	25,535
6 [32;36)	0,531	0,607	0,076	12,521
7 [36;40)	0,572	0,607	0,035	5,766
8 [40;44,5]	0,653	0,607	0,046	7,578

Experimento 2

Intervalo de clase	k exp_promedio	K teórico	Error Absoluto	Error Relativo
1 [14;17)	0,612	0,607	0,005	0,824
2 [17;20)	0,450	0,607	0,157	25,865
3 [20;23)	0,496	0,607	0,111	18,287
4 [23;26)	0,493	0,607	0,114	18,781
5 [26;29)	0,504	0,607	0,103	16,969
6 [29;32)	0,512	0,607	0,095	15,651
7 [32;35)	0,524	0,607	0,083	13,674
8 [35;40]	0,572	0,607	0,035	5,766

Experimento 3

Intervalo de clase	k exp_promedio	K teórico	Error Absoluto	Error Relativo
1 [18;21)	0,808	0,607	0,201	33,114
2 [21;24)	0,492	0,607	0,115	18,946
3 [24;27)	0,529	0,607	0,078	12,850
4 [27;30)	0,553	0,607	0,054	8,896
5 [30;33)	0,577	0,607	0,03	4,942
6 [33;36)	0,566	0,607	0,041	6,755
7 [36;39]	0,561	0,607	0,046	7,578
8 [39;42]	0,525	0,607	0,082	13,509
9 [42;45]	0,546	0,607	0,061	10,049
10 [45;49]	0,591	0,607	0,016	2,636

Figura 20

Gráfico resumen utilizando el primer método de cálculo

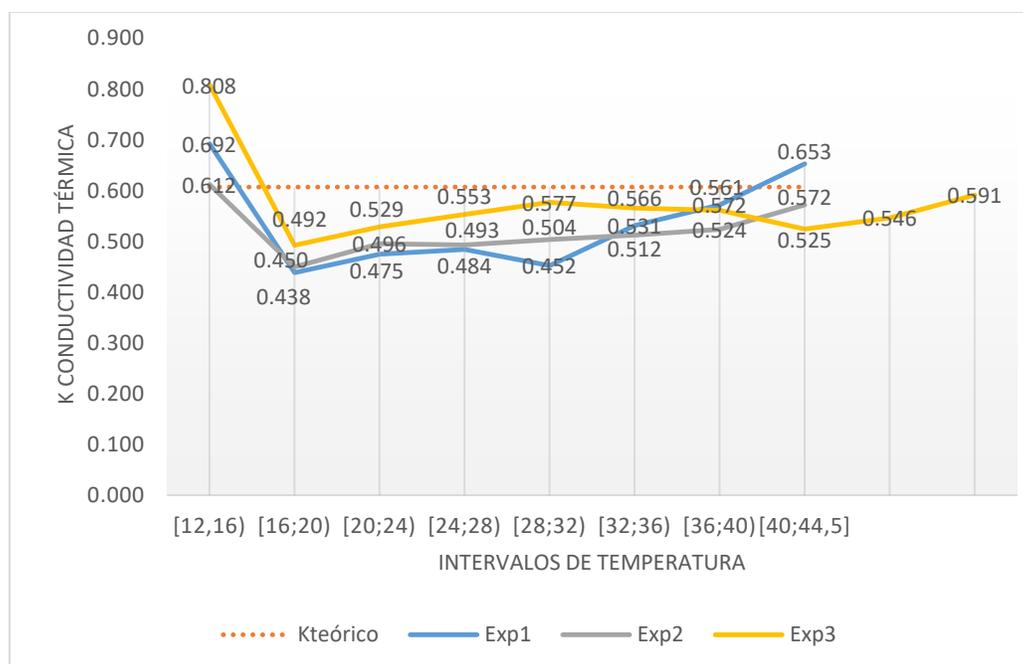


Tabla 12

Cálculo de la conductividad térmica del agua destilada. Utilizando el segundo método

Experimento 1					
Intervalo de clase		k exp_promedio	K teórico	Error Absoluto	Error Relativo
1	[12,16)	0,678	0,607	0,071	11,697
2	[16;20)	0,447	0,607	0,160	26,359
3	[20;24)	0,471	0,607	0,136	22,405
4	[24;28)	0,480	0,607	0,127	20,923
5	[28;32)	0,449	0,607	0,158	26,030
6	[32;36)	0,526	0,607	0,081	13,344
7	[36;40)	0,566	0,607	0,041	6,755
8	[40;44,5]	0,645	0,607	0,038	6,260
Experimento 2					
Intervalo de clase		k exp_promedio	K teórico	Error Absoluto	Error Relativo
1	[14;17)	0,603	0,607	0,004	0,659
2	[17;20)	0,446	0,607	0,161	26,524

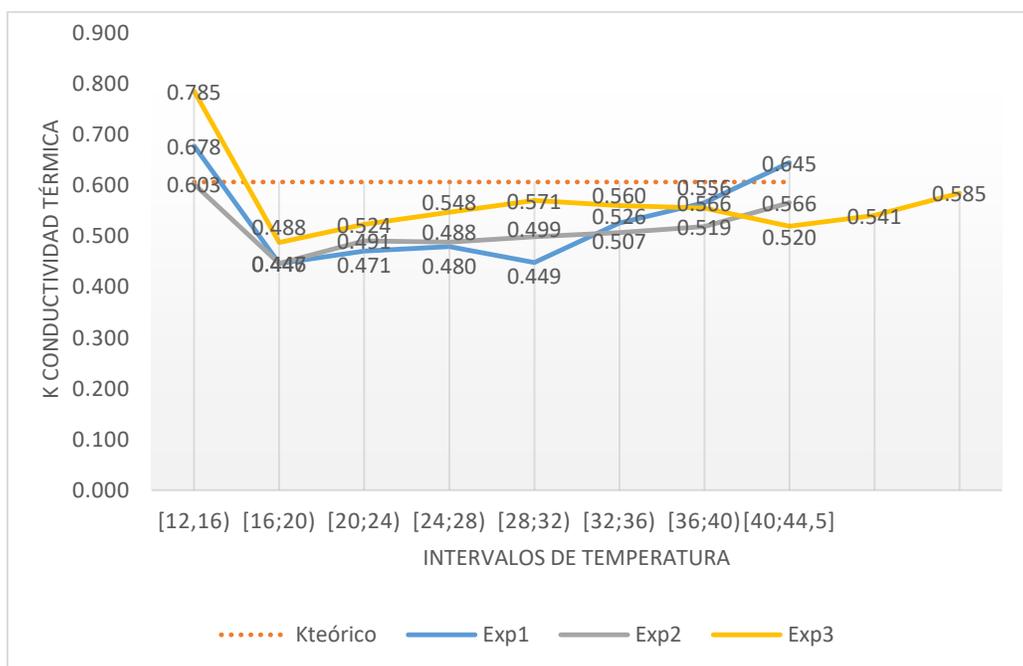
3	[20;23)	0,491	0,607	0,116	19,110
4	[23;26)	0,488	0,607	0,119	19,605
5	[26;29)	0,499	0,607	0,108	17,792
6	[29;32)	0,507	0,607	0,100	16,474
7	[32;35)	0,519	0,607	0,088	14,498
8	[35;40]	0,566	0,607	0,041	6,755

Experimento 3

Intervalo de clase	k	K	Error Absoluto	Error Relativo	
	exp_promedio	teórico			
1	[18;21)	0,785	0,607	0,178	29,325
2	[21;24)	0,488	0,607	0,119	19,605
3	[24;27)	0,524	0,607	0,083	13,674
4	[27;30)	0,548	0,607	0,059	9,720
5	[30;33)	0,571	0,607	0,036	5,931
6	[33;36)	0,560	0,607	0,047	7,743
7	[36;39]	0,556	0,607	0,051	8,402
8	[39;42]	0,520	0,607	0,087	14,333
9	[42;45]	0,541	0,607	0,066	10,873
10	[45;49]	0,585	0,607	0,022	3,624

Figura 21

Gráfico resumen utilizando el segundo método de cálculo



De igual forma se realiza para la glicerina tres experimentos para obtener repetitividad, los resultados del primer método se detallan en la Tabla 13, mientras que los resultados por el segundo método se detallan en la Tabla 14. La unión de los experimentos de la glicerina se realiza por medio de un gráfico para cada método (ver Figura 22 y Figura 23).

Tabla 13

Cálculo de la conductividad térmica de la glicerina. Utilizando el primer método K_{exp}

Experimento 1					
Intervalo de clase	k exp_promedio	K teórico	Error Absoluto	Error Relativo	
1 [15;18)	0,639	0,284	0,339	119,37	
2 [18;21)	0,310	0,284	0,024	8,45	
3 [21;24)	0,316	0,284	0,03	10,56	
4 [24;27)	0,319	0,284	0,034	11,97	
5 [27;30)	0,330	0,284	0,044	15,49	
6 [30;33)	0,340	0,284	0,054	19,01	
7 [33;36)	0,338	0,284	0,052	18,31	
8 [36;39)	0,328	0,284	0,042	14,79	
9 [39;42)	0,318	0,284	0,032	11,27	
Experimento 2					
Intervalo de clase	k exp_promedio	K teórico	Error Absoluto	Error Relativo	
1 [13;16,5)	0,939	0,284	0,559	196,83	
2 [16,5;20)	0,341	0,284	0,031	10,92	
3 [20;23,5)	0,378	0,284	0,065	22,89	
4 [23,5;27)	0,374	0,284	0,061	21,48	
5 [27;30,5)	0,358	0,284	0,046	16,20	
6 [30,5;34)	0,366	0,284	0,054	19,01	
7 [34;37,5)	0,357	0,284	0,045	15,85	
8 [37,5;41)	0,329	0,284	0,02	7,04	
9 [41;44,5)	0,326	0,284	0,017	5,99	
10 [44,5;48)	0,314	0,284	0,006	2,11	
Experimento 3					
Intervalo de clase	k exp_promedio	K teórico	Error Absoluto	Error Relativo	
1 [14;18)	0,653	0,284	0,306	107,75	
2 [18;22)	0,319	0,284	0,011	3,87	
3 [22;26)	0,314	0,284	0,006	2,11	

4	[26;30)	0,313	0,284	0,005	1,76
5	[30;34)	0,304	0,284	0,003	1,06
6	[34;38)	0,297	0,284	0,01	3,52
7	[38;42)	0,308	0,284	0,001	0,35
8	[42;48)	0,305	0,284	0,002	0,70

Figura 22

Gráfico resumen utilizando el primer método de cálculo

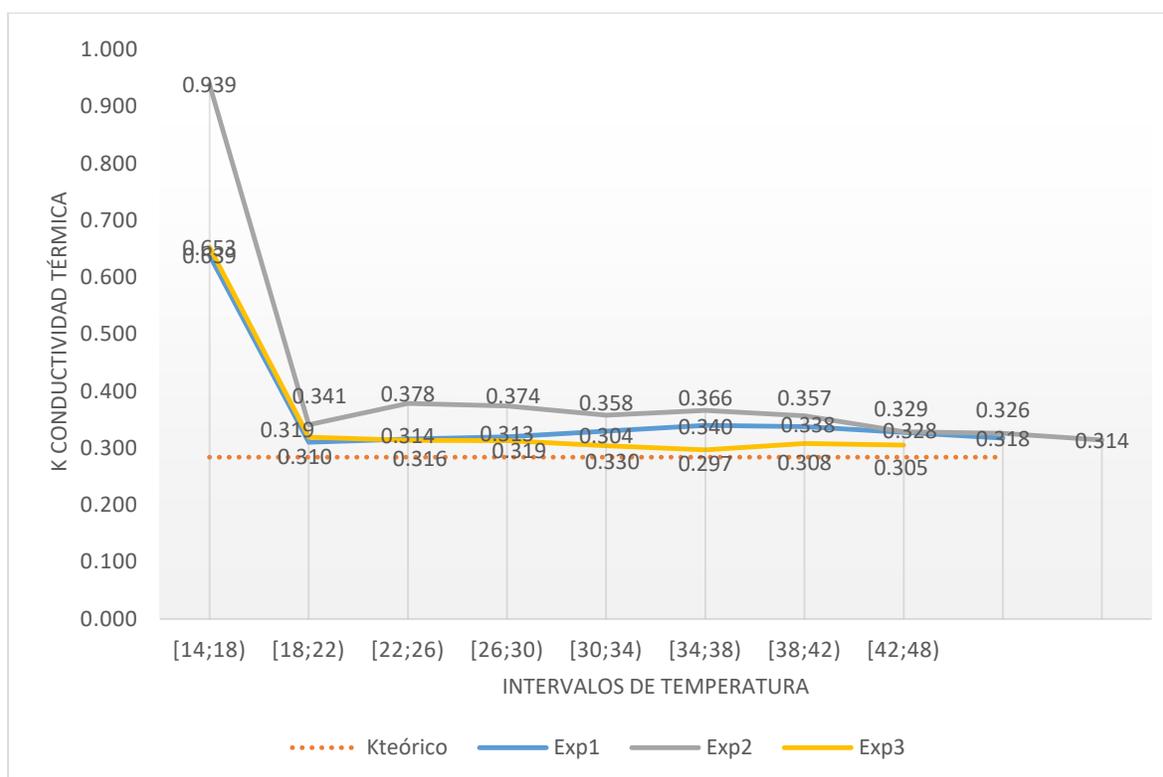


Tabla 14

Cálculo de la conductividad térmica de la glicerina. Utilizando el segundo método K_{exp}

Experimento 1					
Intervalo de clase	k exp_promedio	Kteórico	Error Absoluto	Error Relativo	
1,000 [15;18)	0,623	0,284	33,915	119,419	
2,000 [18;21)	0,308	0,284	2,445	8,609	
3,000 [21;24)	0,314	0,284	3,027	10,659	
4,000 [24;27)	0,318	0,284	3,364	11,846	

5,000	[27;30)	0,328	0,284	4,385	15,439
6,000	[30;33)	0,338	0,284	5,356	18,859
7,000	[33;36)	0,336	0,284	5,163	18,178
8,000	[36;39)	0,326	0,284	4,179	14,716
9,000	[39;42)	0,316	0,284	3,190	11,234

Experimento 2

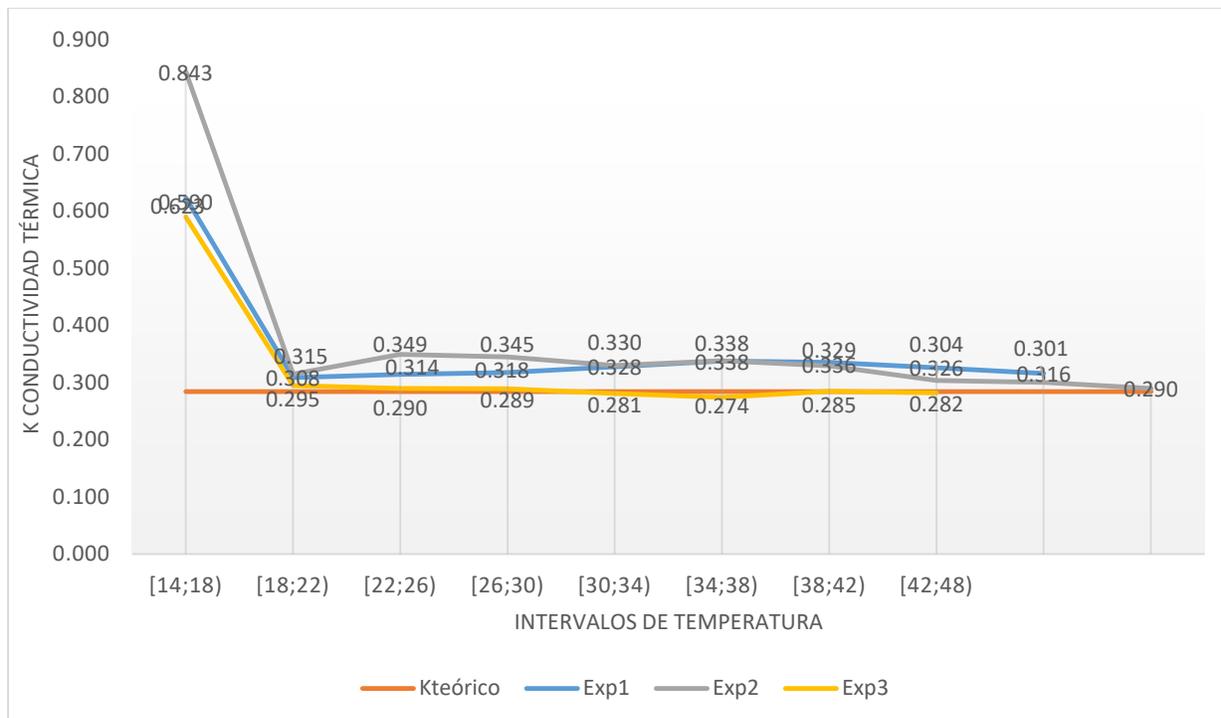
Intervalo de clase	k exp_promedio	Kteórico	Error Absoluto	Error Relativo	
1,000	[13;16,5)	0,843	0,284	55,919	196,897
2,000	[16,5;20)	0,315	0,284	3,102	10,923
3,000	[20;23,5)	0,349	0,284	6,525	22,974
4,000	[23,5;27)	0,345	0,284	6,105	21,495
5,000	[27;30,5)	0,330	0,284	4,608	16,226
6,000	[30,5;34)	0,338	0,284	5,405	19,031
7,000	[34;37,5)	0,329	0,284	4,544	15,999
8,000	[37,5;41)	0,304	0,284	1,961	6,906
9,000	[41;44,5)	0,301	0,284	1,662	5,852
10,000	[44,5;48)	0,290	0,284	0,604	2,126

Experimento 3

Intervalo de clase	k exp_promedio	Kteórico	Error Absoluto	Error Relativo	
1,000	[14;18)	0,590	0,284	30,552	107,577
2,000	[18;22)	0,295	0,284	1,094	3,851
3,000	[22;26)	0,290	0,284	0,598	2,106
4,000	[26;30)	0,289	0,284	0,543	1,912
5,000	[30;34)	0,281	0,284	0,301	1,058
6,000	[34;38)	0,274	0,284	0,952	3,352
7,000	[38;42)	0,285	0,284	0,075	0,264
8,000	[42;48)	0,282	0,284	0,204	0,718

Figura 23

Gráfico resumen utilizando el segundo método de cálculo



Análisis de los resultados del agua destilada

Como se puede observar en las Figuras 20 y 21 de la conductividad térmica del agua destilada los dos métodos nos entregan resultados muy cercanos donde solo se difiere en la milésima la conductividad térmica, por lo tanto, no es un factor importante los métodos de cálculo utilizados. Por otra parte, la conductividad térmica del agua destilada aumenta ligeramente con la temperatura a presión constante.

El intervalo que describe la estabilidad del fluido está entre aproximadamente los 26 a los 45 grados centígrados. Sin embargo, el intervalo que más se acercó al valor teórico fue de los 32 a 40 grados centígrados teniendo errores promedios absolutos de $0.005 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, así

como el valor del error promedio porcentual relativo fue de 8.66 %. El valor promedio de las gráficas en este intervalo es de 0.526 (W/m), muy cercano al valor teórico de 0.607 (W/m).

La tendencia de la gráfica indica que si aumenta la temperatura del fluido acercándose a su cambio de fase la conductividad térmica se alejaría más del resultado teórico y la razón es porque entre mayor temperatura, la convección natural del fluido empieza a tener mayor importancia en el análisis haciendo que las ecuaciones utilizadas para este tipo de equipo sean ineficientes, por lo tanto, estos resultados son descartados. La temperatura que se utiliza para los gráficos es de la termocupla que está colocada en la parte exterior del cilindro concéntrico.

Análisis de resultados de la glicerina

Como se observa la Figura 22 y 23 la conductividad térmica de la glicerina se comporta mucho más estable en comparación con el agua destilada a pesar de aumentar la temperatura, los mejores resultados se obtuvieron en todo el rango de temperatura testeada, es decir, de los 18 grados centígrados a los 48 grados centígrados. Al igual que ocurre con el agua el equipo se espera que aumente aproximadamente 3 grados para estabilizarse y empezar a emitir buenos resultados.

El promedio del error absoluto para la glicerina fue de 0.045 W/m*°C. El valor promedio de las gráficas en todo el intervalo es de 0.330 (W/m), muy cercano al valor teórico de 0.284(W/m). El error porcentual promedio de los tres experimentos es de 12.59% esto se debe a la exactitud de la instrumentación.

La tendencia de la conductividad térmica de la glicerina, en comparación a del agua destilada, no sube de forma significativa, haciendo que a lo largo de toda la temperatura testeada se obtengan resultados óptimos.

Propagación de errores

Para encontrar el error general del equipo se utiliza la técnica de propagación de errores, este método nos permite conocer el grado de importancia de las variables. Con esta

técnica determinamos que factores son importantes para tener una medición correcta, las variables que se valoran son: la geometría del equipo y las propiedades conductoras del material utilizado en la construcción del equipo. Se utiliza la ecuación [36] para desarrollar las derivadas parciales con respecto a cada variable de importancia esta función es dependiente a $R1, R2, R3, R4, k_{cobre}$ y q_{total} .

$$f(x) = k_{agua} = \frac{\ln \frac{R3}{R2}}{2 * \pi * \left(\frac{T1 - T4}{\dot{q}_{total}} + \frac{\ln \frac{R2}{R1}}{2 * \pi * k_{cobre}} + \frac{\ln \frac{R4}{R3}}{2 * \pi * k_{cobre}} \right)} \quad [46]$$

Se deriva respecto a R1 como lo muestra en la ecuación [47]

$$\frac{d}{dR1} [f'(R_1)] = \frac{\ln \frac{R3}{R2}}{4 * \pi^2 * k * R1 * \left(\frac{T1 - T4}{\dot{q}_{total}} + \frac{\ln \frac{R2}{R1}}{2 * \pi * k_{cobre}} + \frac{\ln \frac{R4}{R3}}{2 * \pi * k_{cobre}} \right)^2} \quad [47]$$

Se deriva respecto a R2 como lo muestra en la ecuación [48]

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dR2} [f'(R_2)] \\ = & - \frac{k_{cobre} * \dot{q}_{total} \left(\dot{q}_{total} * \ln \left(\frac{R2}{R1} \right) + \dot{q}_{total} * \ln \left(\frac{R3}{R2} \right) - 2 * k_{cobre} * t4 + 2 * k_{cobre} * t1 + \dot{q}_{total} * \ln \left(\frac{R4}{R3} \right) \right)}{R2 * \left(\dot{q}_{total} * \ln \left(\frac{R2}{R1} \right) - 2 * \pi * k_{cobre} * T4 + 2 * \pi * k_{cobre} * T1 + \dot{q}_{total} * \ln \left(\frac{R4}{R3} \right) \right)^2} \end{aligned} \quad [48]$$

Se deriva respecto a R3 como lo muestra en la ecuación [49]

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dR3} [f'(R_3)] \\ = & \frac{k_{cobre} * \dot{q}_{total} \left(\dot{q}_{total} * \ln \left(\frac{R3}{R2} \right) + \dot{q}_{total} * \ln \left(\frac{R4}{R3} \right) - 2 * \pi * k_{cobre} * T4 + 2 * \pi * k_{cobre} * T1 + \dot{q}_{total} * \ln \left(\frac{R2}{R1} \right) \right)}{R3 * \left(\dot{q}_{total} * \ln \left(\frac{R4}{R3} \right) - 2 * \pi * k_{cobre} * T4 + 2 * \pi * k_{cobre} * T1 + \dot{q}_{total} * \ln \left(\frac{R2}{R1} \right) \right)^2} \end{aligned} \quad [49]$$

Se deriva respecto a R4 como lo muestra en la ecuación [50]

$$\frac{d}{dR_4} [f'(R_4)] = \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{4 * \pi^2 * k_{cobre} * R_4 * \left(\frac{\ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right)}{2 * \pi * k_{cobre}} + \frac{T_1 - T_4}{\dot{q}_{total}} + \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2 * \pi * k_{cobre}} \right)^2} \quad [50]$$

Se deriva respecto a q_{total} como lo muestra en la ecuación [51]

$$\frac{d}{dq_{total}} [f'(\dot{q}_{total})] = \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right) (T_1 - T_4)}{2 * \pi * \dot{q}_{total}^2 * \left(\frac{\ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right)}{2 * \pi * k_{cobre}} + \frac{T_1 - T_4}{\dot{q}_{total}} + \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2 * \pi * k_{cobre}} \right)^2} \quad [51]$$

Se deriva respecto a k_{cobre} como lo muestra en la ecuación [52]

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dk_{cobre}} [f'(k_{cobre})] \\ &= \frac{\dot{q}_{total}^2 * \ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right) \left(\ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right) + \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right)}{\left((2 * \pi * T_4 - 2 * \pi * T_1) * k_{cobre} - \dot{q}_{total} * \ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right) - q_{total} * \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right)^2} \end{aligned} \quad [52]$$

Por lo tanto, la ecuación de la propagación de errores nos quedaría de la siguiente forma:
ecuación [53]

$$\begin{aligned} & [\delta f(R_1, R_2, R_3, R_4, k_{cobre} \text{ y } \dot{q}_{total})] \\ &= \left| \frac{\partial f}{\partial R_1} \right| \delta R_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial R_2} \right| \delta R_2 + \left| \frac{\partial f}{\partial R_3} \right| \delta R_3 + \left| \frac{\partial f}{\partial R_4} \right| \delta R_4 + \left| \frac{\partial f}{\partial k_{cobre}} \right| \delta k_{cobre} \\ &+ \left| \frac{\partial f}{\partial \dot{q}_{total}} \right| \delta \dot{q}_{total} \end{aligned} \quad [53]$$

Se utiliza los datos de la tabla 15 para los reemplazos de las ecuaciones [47], [48], [49], [50], [51], y [52]

Tabla 15

Datos para encontrar la propagación de errores

DATOS	Valor numérico	Unidades
R3	14,9	mm
R2	12,4	mm
R1	4,9	mm
R4	22,4	mm
Kcobre	400	W/m.°C
L	0,2	m
T1	16,8	°C
T4	15,6	°C

Tabla 16

Tabla de resultados de los errores

Variable (Reemplazada)	Cantidad
K (R1)	2,30E-04
K (R2)	1,26E-01
K(R3)	1,05E-01
K(R4)	5,04E-05
K(qtotal)	2,41E-02
K(Kcobre)	3,77E-06

El delta de temperatura fue tomado de los experimentos de la glicerina. Mediante esta técnica de propagación de errores se encuentra que la variable R2 y R3 son las medidas más influyentes del equipo. El radio 2 (R2) es el radio exterior del cilindro interno y el radio 3 (R3) es el radio interior del cilindro externo, por lo tanto, se deduce que la principal variable del diseño del equipo es la distancia que existe entre los dos cilindros también llamada espacio anular.

Capítulo V

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Conclusiones

- El método de cilindros concéntricos cumplió con el objetivo de diseño el cual fue minimizar la convección térmica y prioriza la conducción térmica en los fluidos testeados. La característica de diseño con más relevancia es el espacio anular que existe entre los dos cilindros concéntricos. Se analizó el calor perdido por el tanque que es mínimo, por lo tanto, el diseño del tanque logró que el cilindro externo no transfiera calor con el medio ambiente.
- En esta investigación se logró medir la conductividad térmica de dos fluidos; la glicerina se comportó de una forma lineal y estable. El resultado promedio de la conductividad térmica de la glicerina fue de 0,33 W/m en un intervalo de temperatura entre los 20 °C a los 48 °C con un error absoluto promedio de 0.05 W/m*°C. El error promedio relativo de los tres experimentos fue de 12.59%. Por otra parte, el comportamiento del agua es variable, tiene la tendencia a aumentar la conductividad térmica con el aumento de temperatura, los mejores resultados se obtuvieron en el intervalo de temperatura de 32°C a 40°C, esto se debe a las propiedades físicas del fluido como densidad, calor específico y punto de ebullición; en este intervalo se obtuvo un error absoluto de 0.045 W/m*°C y en este sector se obtuvo un error porcentual de 8.66%.
- En la obtención de la conductividad térmica de un fluido, la variable más relevante es el espacio anular que existe entre los cilindros concéntricos, se comprobó este hecho mediante la técnica de propagación de errores que permite priorizar las variables de diseño. En esta investigación el espacio anular

es de 2.5 mm lo que asegura que la convección natural del fluido sea despreciable

- Se implementó un análisis de materiales para los diferentes elementos que conforman el equipo, de esta forma se puede garantizar la durabilidad y correcto funcionamiento del equipo.

Recomendaciones

- El inicio del experimento la temperatura del agua dentro del tanque debe ser de máximo 20°C, porque las temperaturas dentro de los cilindros concéntricos tienden a igualarse con la temperatura mayor que normalmente es la del tanque, además en el inicio del proceso, el equipo se demora 3 °C aproximadamente en tener resultados viables para la conductividad térmica del fluido, en consecuencia entre mayor sea la temperatura del tanque se perderán valores experimentales importantes para la construcción de la gráfica de resultados de la conductividad térmica.
- Manipular con precaución los elementos del equipo, principalmente al terminar el ensayo. Es recomendable dejar un tiempo para que se enfríe el fluido del tanque porque la experimentación puede llegar a elevadas temperaturas y puede ser peligroso tocar el fluido del reservorio.
- Es primordial que al final de cada experimentación, sin importar el fluido a ser testeado, realizar una limpieza dentro de los cilindros concéntricos, es decir en el espacio anular, para lo cual únicamente es necesario realizarlo mediante agua a baja presión.
- Si se desea realizar la experimentación de un fluido a temperaturas mayores a la temperatura de evaporación del agua, es decir 100°C, se recomienda utilizar un

fluido distinto al agua para llenar el tanque para que de esta manera pueda alcanzar estas elevadas temperaturas.

Trabajos futuros

- Es posible mejorar la eficiencia del equipo a través de la automatización de algunos procesos como son: la toma de datos de temperatura exterior e interior de los cilindros concéntricos, así como el encendido y apagado de la resistencia dentro del tanque.
- La máquina realizada en esta investigación tiene muchas aplicaciones en la industria alimenticia, por lo tanto, se recomienda utilizar otros fluidos como pulpas de jugos, aceites, salsas, entre otros.
- Dentro de la bibliografía no se encontró investigaciones que utilicen este equipo para medir la conductividad térmica de fluidos industriales como, por ejemplo: aceite térmico, refrigerantes, entre otros, por lo que se recomienda plantear una investigación en el que se teste este tipo de fluidos.

Bibliografía

- Alvarado, S., Marín, E., Juárez, A., & Calderón, A. (2012). A hot-wire method based thermal. *EUROPEAN JOURNAL OF PHYSICS*, 897-906.
- Bellet, D., Sengelín, M., & Thirriot, C. (1975). Determination des propriétés thermophysiques de liquides non-newtoniens à l'aide d'une cellule à cylindres coaxiaux. *Int. J. Heat Mass Transfer*.
- Bird, B. R., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2006). *Fenómenos de transporte*. México: Limusa Wiley.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. México: McGRAW-HILL.
- Costa B., H. C., Silva, D. O., & Vieira M., L. G. (2018). A numerical and experimental analysis of the methodology of thermal conductivity measurements in fluids by concentric cylinders. *Springer*, 15.
- Faêda, K., Lameiras, F., Carneiro, L., & Camarano, D. (2010). CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE DIÓXIDO DE URÂNIO PELO. *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, -.
- Giraldo-Gómez, G. I., Gabas, A. L., Telis Nicoletti, V. R., & Telis-Romero, J. (2010). Propiedades termofísicas del jugo concentrado de lulo a temperaturas por encima del punto de congelación. *Ciencia e Tecnología de Alimentos*, 6.
- Hechavarría, R., Delgado, O., & Pazmiño, F. (2017). Estudio de un nuevo procedimiento para medir la conductividad térmica y difusividad térmicas de materiales. *INGENIUS*, 8.
- Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Prentice Hall.
- LINSEIS. (2021). *LFA 1000 (Medición laser de alto rendimiento)*. Obtenido de <https://www.linseis.com/es/productos/difusividad-termica-y-conductividad-termica/lfa-1000/#:~:text=En%20las%20C3%BAltimas%20d%20C3%A9cadas%20el,de%20s%20C3%B3lidos%20C20polvos%20y%20C3%ADquidos.&text=Los%20tres%20hornos%20intercambiables%20por,125%20has>
- Llavona, M. A., Zapico, R., Blanco, F., Verdeja, L. F., & Sancho, J. p. (1991). Methods for measuring thermal conductivity. *RDM Revista de Minas*, 89-98.
- Llavona, M. A., Zapico, R., Blanco, F., Verdeja, L. F., & Sancho, J. P. (1991). Methods for measuring thermal conductivity. *Revista de Minas*.
- Rieutord, M. (2015). *Una introducción a la dinámica de fluidos*. New York: Springer.
- Sreenivasan, k., & Altman, M. (1969). The Determination of Thermal Diffusivities of Thermal Energy Storage Materials. 189-197.
- Telis-Romero, J., Telis, V. R., Gabas, A. L., & Yamashita, F. (1998). Thermophysical properties of brazilian orange juice as affected by temperature and water content. *Journal of Food Engineering*.
- Van Der Held, E. F., & Van Drunen, F. G. (1949). A method of measuring the thermal conductivity of liquids. *Physica XV*.

Vera Alvarado, K. R., & Rueda Palacios, R. J. (2018). Diseño y construcción de un equipo medidor de conductividad térmica. Guayaquil, Guayas, Ecuador.

White, F. M. (2004). *Mecánica de fluidos*. Madrid: McGraw-Hill.

Yüksel, N. (31 de Agosto de 2016). *The Review of Some Commonly Used Methods and Techniques to Measure the Thermal Conductivity of Insulation Materials*. Obtenido de intechopen: <https://www.intechopen.com/books/insulation-materials-in-context-of-sustainability/the-review-of-some-commonly-used-methods-and-techniques-to-measure-the-thermal-conductivity-of-insul>

Anexos